

# 南方水蚀区不同侵蚀程度土壤粒径分形研究

陈子玉, 顾祝军

(南京晓庄学院 生物化工与环境工程学院, 南京 211171)

**摘 要:**土壤粒径分布是土壤和环境要素综合作用的结果,因而可藉以指示环境要素的某种性状。对南方水蚀区不同侵蚀程度下土壤粒径的分布特征进行研究,计算土壤粒径分布分形维数值,并分析其与土壤质地和土壤侵蚀程度的关系。结果表明,研究区土壤质地主要为砾石土,其 2 mm 以下的体积分形维数和重量分形维数分别介于 2.52~2.99 和 2.48~2.73 之间,粒径重量累积百分比在 2 mm 处产生显著变化,粒径域的重量分形维数在 2 mm 以上和 2 mm 以下分别为 1.79~2.81 和 2.52~2.79。2 mm 以上粒径域的重量分形维数与土壤质地和土壤侵蚀程度呈显著的相关性。土壤质地越细,或土壤侵蚀越轻微,2 mm 以上粒径域的重量分形维数越大,反之亦然。故土壤 2 mm 以上粒径域的重量分形维数可综合表征研究区土壤质地和土壤侵蚀程度。

**关键词:**南方水蚀区;土壤粒径分布;分形;土壤侵蚀

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0013-05

## Study on the Fractal Dimension of Soil Particle Size Distribution in Areas with Different Water-Erosion Degrees in Southern China

CHEN Zi-yu, GU Zhu-jun

(School of Biochemical and Environmental Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

**Abstract:** Soil particle size distribution is the result of interactions between soils and their environmental factors, so it can reflect certain properties of environmental factors. Aimed at analyzing the characteristics of particle size distribution of the soil under different water-erosion degrees in southern China, the fractal dimension of the soil particle size distribution was calculated, and the relationships between the fractal dimension values and soil textures or soil erosion degrees was explored. The results showed that, the gravelly soil dominated the soil textures in the study area. The volume and weight fractal dimension values of the soil particles less than 2 mm were between 2.52 to 2.99 and 2.48 to 2.73, respectively. The accumulated percentage of weight changed significantly at the soil particle size of 2 mm, and the weight fractal dimension values were 1.79~2.81 and 2.52~2.79 for the soil particle size greater than 2 mm and lower than 2 mm, respectively. The weight fractal dimension values for the soil particle size greater than 2 mm were significantly related to both soil textures and soil erosion degrees. The finer the soil texture or the less severely the soil eroded, the greater the weight fractal dimension for the soil particle size which is greater than 2 mm, and vice versa. Therefore, the weight fractal dimension for the soil particle greater than 2 mm can indicate the soil texture and soil erosion degree in the study area.

**Key words:** southern water-erosion area; particle size distribution; fractal dimension; soil erosion

土壤侵蚀是全球性的环境问题之一,是全球变化的重要研究内容<sup>[1]</sup>。在土壤水蚀过程中,坡面径流通过冲刷和运移,使土壤粒径组成发生变化<sup>[2]</sup>,使得不同土壤侵蚀程度造成的土壤粒径分布不同。对水蚀区不同侵蚀程度下土壤粒径分布特征的分析,可为水土流失研究、监测和治理提供理论依据。土壤粒径分

布是指土壤固相中不同粗细级别的土粒所占的比重,常用某一粒径及其对应的累积百分含量曲线来表示<sup>[3]</sup>。土壤粒径分布的测量方法众多,如直接测量法、筛分法、沉降法和显微镜法。近年来利用激光衍射原理制造的激光粒度分析仪得到了广泛的应用,相比于传统的粒度测量方法,激光测量法具有适应性

广、测量迅速、重现性好和精度较高等优点,但该方法测量的粒径范围仍然有限。

为了描述完整的土壤粒径分布,人们建立了多种粒径估值模型,如对数正态分布、逻辑生长形式、对数线性以及三次样条模型等。与此同时,土壤粒径分布具有明显的分形特征,分形理论亦已广泛应用于土壤粒径研究。Mandelbrot<sup>[4]</sup>首先建立了二维空间的颗粒大小分形特征模型。Tyler 等<sup>[5]</sup>在此基础上进行了推广,建立了三维空间的粒径分布分形维数模型,也即是用土壤粒径的体积分布计算土壤的粒径分布分形维数。Tyler 等<sup>[6]</sup>和杨培岭等<sup>[7]</sup>分别通过假设不同的土壤粒级具有相同的密度等条件,用土壤重量来代替土壤的体积,推导出计算土壤粒径分布分形维数的重量分布模型。杨金玲等<sup>[8]</sup>对我国土壤的分形研究表明,体积分形维数与重量分形维数之间具有相关性,建立了黏粒、粉粒和沙砾的体积分形维数和重量分形维数之间的相关方程。

研究表明,土壤粒径分形维数能定量地表征土壤的物理特征<sup>[9]</sup>,如土壤质地、土壤孔隙表面、土壤变性过程、黏土孔隙以及土壤的水理性质等。通过土壤粒径分形维数可以表征土壤空间的异质性等环境的变化<sup>[10-11]</sup>。马云等<sup>[12]</sup>对三峡库区坡耕地土壤分形特征及土壤可蚀性影响进行了研究,结果表明,有植物篱的小区土壤颗粒分形维数的变化量都大于对照小区,土壤侵蚀总体上表现为植物篱带间距 4.5 m>5.5 m>7.5 m,且植物篱带间距<5.5 m 时,植物篱控制坡面土壤侵蚀影响作用较显著。熊波等<sup>[13]</sup>采用周长—面积法进行分形维数计算,研究了云南省土壤侵蚀强度空间结构,结果表明,分形维数依次为极强度水力侵蚀>中度水力侵蚀>微度冻融侵蚀>微度水力侵蚀

>轻度水力侵蚀>强度水力侵蚀>剧烈水力侵蚀。

现有研究多基于<2 mm 的土壤粒径范围,对于粒径>2 mm 且砾石含量较高的土壤研究较少,土壤粒径分形维数与土壤侵蚀程度的相关研究鲜有报道。本文拟计算南方典型水蚀区福建省长汀县河田镇不同侵蚀程度下土壤的粒径分布分形维数,并分析其与土壤质地和土壤侵蚀程度的关系,以期为相关研究和管理提供参考。

# 1 研究区概况与材料、方法

## 1.1 研究区概况

研究区河田镇位于福建省长汀县东南部(116°16′—116°30′E,25°35′—25°46′N),是我国南方典型的花岗岩红壤侵蚀区。风化层深厚的低山丘陵广布,花岗岩风化壳一般厚 10 m,有的厚达 100 m。土壤为花岗岩风化发育的山地丘陵红壤,含砂量大,风化层深厚,成土母质绝大部分是燕山早期黑云母花岗岩,其组成以石英为主。属中亚热带季风性气候,多年平均降雨量为 1 716.4 mm。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,由于长期受人为因素影响,阔叶林基本破坏殆尽,重建植被主要是马尾松、灌丛及荒草坡等人工植被和次生植被,结构简单,生长较差。

## 1.2 土壤样品采集和属性分析

于 2011 年 4 月在河田镇低山丘陵区进行土壤样品采集,用梅花型采样法采集 0—20 cm 土层土壤样品 1 kg 左右进行混合,带回实验室进行土壤粒径分布测定,共采集样品 48 个。依据我国《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-96》(表 1),用目测法判别了 48 个样方的土壤侵蚀程度,其中极强度、强度、中度、轻度和微度侵蚀的样方分别为 4,4,14,10,16 个。

表 1 水力侵蚀强度分级标准

非耕地林 草覆盖度/%	地面坡度/(°)				
	5~8	8~15	15~25	25~35	>35
60~75	轻度	轻度	轻度	中度	中度
45~60	轻度	轻度	中度	中度	强度
30~45	轻度	中度	中度	强度	极强度
<30	中度	中度	强度	极强度	剧烈

注:数据来源于《土壤侵蚀分类分级标准 SL190—96》。

土壤样品在实验室内风干后,采用四分法选取部分土壤样品过 2 mm 筛,用 6% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 去除有机质,用 0.2 mol/L 的 HCl 去除碳酸盐,用 0.05 mol/L 的稀 HCl 和蒸馏水淋洗土样去除 Ca<sup>2+</sup> 和氯化物,加入 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液搅拌后放置过夜。取土壤风干样品在震筛机上约筛 10 min,然后进行分级称重<sup>[14]</sup>。各级重量的百分比总和应是 100%。筛析法用于分析颗粒的成分 10~6,5~6,3~5,2~3 mm 和小于 2

mm 各级的含量重量。2 mm 以下颗粒使用激光粒度仪(Beckman Coulter LS230, USA)进行超声分散(160 W,10~15 min),以美国制粒径分级标准输出测试结果:2~1,1~0.5,0.5~0.25,0.25~0.1,0.1~0.05,0.05~0.002 mm,<0.002 mm。

## 1.3 分形维数的计算和统计

本文将基于土壤颗粒体积和重量计算的分形维数分别记作体积分形维数  $D_v$  和重量分形维数  $D_{m0}$ ,

则它们满足如下关系<sup>[6-7]</sup>:

$$\frac{V(r\leq R_i)}{V_T}=(\frac{R_i}{R_{\max}})^{3-D_v} \tag{1}$$

$$\frac{M(r'\leq R_i')}{M_T}=(\frac{R_i'}{R_{\max}'})^{3-D_{m0}} \tag{2}$$

式中: $R_{\max}$ ——最大粒级土粒的平均直径; $V$ ——直径  $r$  小于  $R_i$  的累积土粒体积; $V_T$ ——各粒级体积的总和; $R_{\max}'$ ——最大粒级土粒的平均直径; $M$ ——直径  $r'$  小于  $R_i'$  的累积土壤粒径重量; $M_T$ ——土壤各粒级重量的总和。(1)和(2)式两边取对数,生成不同粒径等级和对应的累积体积和累积重量含量分布的对数曲线,根据最小二乘法对回归曲线进行拟合,则该直线斜率为式中的  $3-D_v$  和  $3-D_{m0}$ ,从而分别可得体积分形维数  $D_v$  和重量分形维数  $D_{m0}$ 。2 mm 以下不同粒径的重量是根据式(2)假设不同土壤粒径密度相等,将体积百分比转化成重量百分比计算所得。

为分析土壤粒径分形与土壤质地和侵蚀程度的关系,分别基于土壤质地和侵蚀程度用最小显著差法 LSD(least-significant difference)进行多重比较。数据统计分析采用 Excel 和 SPSS 19.0 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤粒径分布分形维数

根据式(1)和(2)分别计算各采样点的  $D_v$  与

$D_{m0}$ ,结果显示, $D_v$  分布在 2.52~2.99 之间, $D_{m0}$  分布在 2.48~2.73 之间(表 2)。在 48 个样品中随机选取一个样品的土壤粒径累积重量分数与粒径双对数拟合曲线(图 1)可以看出,土壤粒径累积重量分数与粒径之间整体上不是严格的线性关系,在图中 x 轴 -0.698 97 以及 -2.301 处,也就是土壤粒径在 2 mm 和 0.05 mm 处重量百分比有着明显的差异。但是,0.05 mm 与 0.002 mm 是相邻粒级,用两个粒径进行分域将难以进行最小二乘法拟合,因此以 2 mm 为边界,分别计算大于 2 mm 土壤粒径域的分形维数  $D_{m1}$  和小于 2 mm 以下土壤粒径域的分形维数  $D_{m2}$ <sup>[15]</sup>。

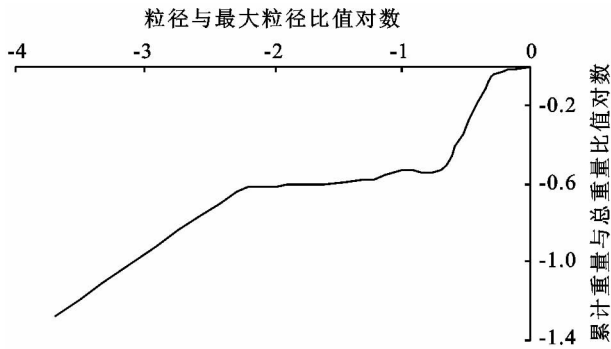


图 1 土壤粒径累积重量与粒径双对数拟合曲线

研究区的土壤粒径分布  $D_{m1}$  分布在 1.79~2.81 之间; $D_{m2}$  分布在 2.52~2.79 之间(表 2)。总体上分形维数较大,而且  $D_{m2}$  和  $D_v$  明显大于  $D_{m0}$  和  $D_{m1}$ 。

表 2 研究区土壤粒径分形维数

分形维数	样本数	极小值	极大值	均值	均值标准误	标准差
$D_v$	48	2.52	2.99	2.6779	0.01156	0.0801
$D_{m0}$	48	2.48	2.73	2.6310	0.00920	0.0638
$D_{m1}$	48	1.79	2.81	2.4014	0.03327	0.2305
$D_{m2}$	48	2.52	2.79	2.6718	0.00951	0.0659

### 2.2 土壤质地与分形

根据土壤筛分结果,计算的土壤样品中除一个样方中的砾石(即>2 mm 的颗粒)重量的含量为27.3%外,其他各样方土壤中的砾石重量的含量均超过30%。根据美国制的颗粒分级标准,以上各样方的土壤均为砾石土。样方中有 10 个样品的砾石含量在70%以上,是重砾石土;24 个样品中的砾石含量为50%~70%,是中砾石土;13 个样品中的砾石含量在30%~50%之间,为轻砾石土。

对所有样方中不同土壤质地的粒径分形维数进行多重比较(表 3),结果表明, $D_{m2}$  和  $D_v$  均值在不同土壤质地之间没有差别, $D_{m0}$  均值在不同土壤质地之间有一定的差别,但并不明显,而  $D_{m1}$  均值在不同土壤质地之间差异显著,表现为重砾石土(2.08)<中砾石土(2.38)<轻砾石土(2.67)。这一结果与砾石土

质地有关,>2 mm 的砾石含量在 30%~50%之间为轻砾石土、50%~70%为中砾石土、大于 70%为重砾石土,而<2 mm 不同土壤粒级含量则与砾石土质地无关,因此以 2 mm 以下土壤不同粒径计算的分形维数  $D_{m2}$  和  $D_v$  则无法反映不同质地之间的差异; $D_{m0}$  由于包含了土壤所有粒径,所以分形维数能在一定程度上反映不同质地之间的差异,但不明显; $D_{m1}$  的计算则是将 2 mm 的粒径作为最小粒级进行计算,因而能反映不同土壤质地间的差异。砾石土质地的平均粒径是重砾石土>中砾石土>轻砾石土,由粗到细。 $D_{m1}$  能很好地定量表示砾石土的质地差异,土壤平均粒径越细, $D_{m1}$  值越大,反之亦然。这一结果与相关研究结论是一致的<sup>[16-17]</sup>。

### 2.3 土壤侵蚀程度与分形

考虑到侵蚀程度相邻等级之间定性分析的不确

定性,将侵蚀程度合并为三级,即强(包含极强度与强度)、中(中度)和弱(包含轻度和微度),将它们各自的分形维数进行多重比较(表 4)。结果显示,不同侵蚀强度之间  $D_v$  均值无显著差异; $D_{m0}$  和  $D_{m2}$  均值略有差异,且  $D_{m2}$  均值在中度侵蚀强度的分形维数中为最小; $D_{m1}$  的差异最明显,且侵蚀强度越强,分形维数越小。这是由于土壤水蚀过程中首先搬运土壤表层细颗粒,促使土壤向粗骨化方向发展<sup>[18-19]</sup>。由此可知,在本地区主要体现在不同砾石粒径粗骨化,2 mm 以下土壤粒径的含量在不同侵蚀强度土壤之间的差异较小。

表 3 不同土壤质地分形维数多重比较

分形维数	轻砾石土	中砾石土	重砾石土
$D_v$	2.66±0.017a	2.69±0.017a	2.69±0.029a
$D_{m0}$	2.66±0.016a	2.63±0.011ab	2.60±0.027b
$D_{m1}$	2.67±0.018a	2.38±0.019b	2.08±0.040c
$D_{m2}$	2.66±0.017a	2.67±0.011a	2.69±0.029a
样本数	14	24	10

注:均值差的显著性水平为 0.05;a. 调和均值样本大小=14.078;b. 组大小不相等,使用组大小的调和均值。

表 4 不同侵蚀程度分形维数多重比较

分形维数	强	中	弱
$D_v$	2.71±0.031a	2.67±0.033a	2.67±0.008a
$D_{m0}$	2.63±0.028ab	2.59±0.020a	2.65±0.008b
$D_{m1}$	2.15±0.066a	2.29±0.005b	2.54±0.031c
$D_{m2}$	2.71±0.003a	2.65±0.022b	2.67±0.008ab
样本数	8	14	26

注:均值差的显著性水平为 0.05。a. 将使用调和均值样本大小=12.772;b. 组大小不相等,使用组大小的调和均值。

本研究中的分形维数  $D_{m1}$  能很好地反映土壤侵蚀程度,为了减少目测法的不精确性,定量确定土壤侵蚀程度,本文利用  $D_{m1}$  表征土壤的侵蚀程度。若样品中  $D_{m1}$  的最大和最小值分别为 A 和 B,某采样点的  $D_{m1}$  值为 F,那么该点的分形维数表征的土壤侵蚀程度 FSE 可用下式计算:

$$FSE=\frac{F-B}{A-B}$$

(3)

FSE 值的范围为 0~1 之间,其值越小说明侵蚀程度越弱,反之,说明侵蚀程度越强。据此,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96),土壤侵蚀程度分为:极强度、强度、中度、轻度和微度,用不同的 FSE 表示(表 5)。

表 5 FSE 表征的侵蚀程度

项目	极强度	强度	中度	轻度	微度
FSE	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1

动用式(3)计算得出本研究中各样点侵蚀程度中的极强度、强度、中度、轻度和微度分别有 3,6,14,

13,12 个。这些侵蚀强度的划分,全部在目测侵蚀强度的范围内,即极强度、强度和中度在目测的极强度至中度之间,中度、轻度和微度在目测范围的中度至微度之间,其中有两个强度调整为极强度、3 个强度调整为中度,3 个中度调整为强度、3 个中度调整为两个轻度和 1 个微度、10 个微度调整为轻度。因而,用 FSE 表征土壤侵蚀程度是可行的。

3 结 论

(1) 在砾石土地区 2 mm 以下土壤粒径分布的体积分形维数( $D_v$ )仅是部分且不能代表全部土壤粒径分布的分形维数,不能完整反映土壤颗粒结构等物理特征;土壤粒径累积重量对数与不同粒径对数之间在整体上不是严格的线性关系,在 2 mm 处重量百分比有着明显的差异。 $>2$  mm 粒径域的土壤粒径重量分形( $D_{m1}$ )能反映土壤颗粒结构等特征。

(2)  $>2$  mm 粒径域的土壤粒径重量分形维数( $D_{m1}$ )随着土壤质地发生明显变化,即土壤质地越细重量分形维数( $D_{m1}$ )越大,土壤质地越粗重量分形维数( $D_{m1}$ )则越小。

(3)  $>2$  mm 粒径域的土壤粒径重量分形维数( $D_{m1}$ )能反映土壤的侵蚀程度,侵蚀程度越大重量分形维数( $D_{m1}$ )就越小,侵蚀程度越微弱重量分形维数( $D_{m1}$ )就越大。

参考文献:

[1] 庄建琦,葛永刚. 土壤侵蚀对土地利用和降雨变化响应和空间分布特征:以金沙江一级支流小江流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(3):288-295.

[2] Frederick R T, Arthur H J, Roy L D. Soil and Water Conservation: Productivity and Environmental Protection[M]. New Jersey: Prentice Hall,1999.

[3] 刘建立,徐绍辉,刘慧. 几种土壤累积粒径分布模型的对比研究[J]. 水科学进展,2003,14(5):588-592.

[4] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry Of Nature[M]. W. H. Freeman,New York,1983.

[5] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science. Soc. Am. J.,1989,53(4):987-999.

[6] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992,56(2):362-369.

[7] 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):1896-1899.

[8] 杨金玲,张甘霖,李德成,等. 激光法与湿筛一吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J]. 土壤学报,2009,46(5):772-780.

- 利水电科技进展,2004,24(2):55-58.
- [7] Hinokidani O, Huang J B, Yasuda H, et al. Study on surface runoff characteristics of a small ephemeral catchment in the northern Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land Studies,2010,20(3):173-178.
- [8] 王幼奇,樊军,邵明安,等.黄土高原水蚀风蚀交错区三种植被蒸散特征[J].生态学报,2009,29(10):5384-5396.
- [9] 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[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1993,18:1-5.
- [10] 王万忠,焦菊英,郝小品.黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系[J].水科学进展,1999,10(2):165-169.
- [11] 李免,李占斌,刘普灵,等.黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀坡向分异特征[J].水土保持学报,2004,18(1):63-65.
- [12] Wang Q X, Takahashi H. A land surface water deficit model for an arid and semiarid region: impact of desertification on the water deficit status in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Climate,1999,12(1):244-257.
- [13] 王云强,张兴昌,从伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异研究[J].农业工程学报,2005,19(1):65-71.
- [14] 王贵作,任立良.基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(4):386-390.
- [15] 焦菊英,王万忠,郝小品.黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J].干旱区资源与环境,1999,13(1):34-42.
- [16] Huang J B, Hinokidani O, Yasuda H, et al. Study on characteristics of the surface flow of the upstream region in Loess Plateau[J]. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE,2008,52:1-6.
- [17] 任立良,刘新仁.基于数字流域的水文过程模拟研究[J].自然灾害学报,2001,9(4):45-52.
- [18] 李忠武,蔡强国,曾光明,等.基于GIS的黄土丘陵沟壑区土壤水分模型研究[J].水利学报,2004(3):123-128.
- [19] 黄金柏,桧谷治,梶川勇树,等.分步型流域“降雨一流出”过程数值模拟方法的研究[J].水土保持学报,2008,22(4):52-55.
- [20] Kobayashi K, Takara K, Tachikawa Y. Parameter estimation of a distributed rainfall-runoff model by a levenberg-marquardt optimization algorithm[J]. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE,2007,51:409-414.
- [21] 汪志荣,沈晋,王文焰,等.黄土区波涌畦灌条件下地表水流运动实验与数值模拟[J].农业工程学报,1994,10(1):36-43.
- ~~~~~
- (上接第16页)
- [9] 侯春梅,刘小伟,梁收运,等.黄土粒度分维在公路自然区划中的应用探讨[J].中国沙漠,2009,29(5):828-834.
- [10] 王丽娟,庞奖励,黄春长,等.关中东部TSG全新世剖面粒度分形特征及古气候意义[J].土壤通报,2012,43(1):1-5.
- [11] 葛东媛,张洪江,郑国强,等.重庆四面山4种人工林地土壤粒径分形特征[J].水土保持研究,2011,18(2):148-151.
- [12] 马云,何丙辉,何建林,等.三峡库区皇竹草植物篱对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):79-87.
- [13] 熊波,陈学华,蒋锦刚,等.云南省土壤侵蚀强度空间结构特征分析[J].水土保持研究,2009,16(3):6-10.
- [14] 高君亮,李玉宝,虞毅,等.毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J].水土保持研究,2010,17(6):220-223.
- [15] 白一茹,汪有科.黄土丘陵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.
- [16] 赵辉,郭索彦,解明曙,等.湖南武水流域泥沙颗粒特性及分形规律研究[J].水土保持学报,2010,24(3):45-49.
- [17] 罗明达,杨吉华,房用,等.沂源石灰岩山地不同植被类型土壤颗粒分形特征研究[J].水土保持研究,2010,17(3):17-21.
- [18] Gregory F, Michael C, Mitchell J K. Nitrogen and phosphorus in eroded sediment from corn and soybean tillage system[J]. Journal of Environment Quality, 1991,20(3):663-670.
- [19] 朱华,程先富,王世航,等.基于GIS的安徽省表层土壤颗粒分形特征研究[J].水土保持研究,2009,16(4):146-155.