

王茂沟流域淤地坝系土壤颗粒与有机碳分布特征研究

惠波^{1,2}, 李鹏¹, 张维³, 高海东¹, 赵宾华¹, 王琦¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

2. 黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站, 陕西 绥德 718000; 3. 咸阳市种苗站, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 为了研究黄土高原丘陵沟壑区坝系坝地土壤颗粒与有机碳的分布特征, 以陕北绥德县王茂沟小流域为研究对象, 选取了47个土壤剖面, 采集土样940个, 分析了分形维数、粗化度、有机碳与各粒径组成之间的关系。结果表明: (1) 研究区坝地的土壤粒径分布中, 粉粒含量占主导地位, 依次为砂粒、黏粒; (2) 王茂沟坝地土壤颗粒的分形维数在2.674~2.829之内变化, 垂直剖面上变化很微小, 坝前、坝中、坝后土壤颗粒分形维数分别为2.803 3, 2.783 6, 2.795 8; (3) 王茂沟坝地土壤质地粗化度在0.27~0.58, 平均值为0.44, 坝前(0.40) < 坝后(0.45) < 坝中(0.46); (4) 坝地土壤颗粒在0.05~0.002 mm和<0.002 mm范围内与土壤颗粒的分形维数成极显著正相关, 在2.0~0.05 mm范围内与土壤颗粒的分形维数成极显著负相关; 坝地土壤有机碳与粉粒和黏粒呈正相关, 与细砂粒和极细砂粒含量呈负相关。

关键词: 坝地; 分形维数; 土壤质地粗化度; 有机碳

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0001-05

Distribution Characteristics of Soil Particles and Organic Carbon on Check-dam System in Wangmaogou Watershed

HUI Bo^{1,2}, LI Peng¹, ZHANG Wei³, GAO Haidong¹, ZHAO Binhua¹, WANG Qi¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Suide Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station, Water Conservancy Committee of Yellow River, Suide 718000, China; 3. Seedling Station of Xianyang, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: In this paper, in order to study distribution characteristics of soil particles and organic carbon in check-dam system in Wangmaogou watershed of hilly-gully Loess Plateau, we collected 47 soil profiles and 940 soil samples, analyzed the fractal dimension, coarsening, organic carbon and the relationship of particle size composition. The results indicated that: (1) the predominant soil particle size was found to be silt in studies area, followed by sand and clay; (2) the soil particle fractal dimension of dam land in Wangmaogou watershed ranged from 2.674 to 2.829. The changes in the vertical profile were very slight, the fractal dimensions of particle size distribution in the front, the middle and the end of the dam were 2.803 3, 2.783 6, 2.795 8, respectively; (3) the soil texture coarsening degrees of dam land in Wangmaogou watershed were between 0.27 and 0.58 with the mean of 0.44, in the front of the dam (0.40) < after the dam (0.45) < in the dam (0.46); (4) the soil particle of dam land had an extraordinary positive correlation with the fractal dimension of soil particle in 0.05~0.002 mm and <0.002 mm, and had an extraordinary negative correlation with the fractal dimension of soil particle in 2.0~0.05 mm; soil organic carbon of dam land had a positive correlation with the contents of silt and clay, and had a negative correlation with the contents of fine sand and very fine sand.

Keywords: dam land; fractal dimension; soil texture coarsening degrees; soil organic carbon

黄河难以治理的“症结”在于泥沙,特别是粗泥沙(粒径>0.05 mm),在粗泥沙集中来源区采取就地拦截无疑是最为有效的办法。淤地坝正是黄土高原减

少水土流失、快速拦截入黄泥沙的行之有效的水土保持工程措施之一,所形成的坝地是汇集流域内径流泥沙淤积形成的特殊土壤,它和常规意义上的土壤有所

不同,因为它是土壤侵蚀的产物,是土壤侵蚀物随水流运移沉积而形成的,其土壤结构具有自身的特征。淤积泥沙粒径是研究淤地坝侵蚀产沙的重要指标^[1],也是研究泥沙输移规律不可缺少的参数之一。

土壤有机碳是研究土壤生产力、土壤水文特性的基础资料,是土壤质量中最为重要的指标之一^[2]。不同粒径土壤颗粒和有机质的相互排列、胶结是造成土壤有机碳变化的主要原因之一。李勇等^[3]认为黄土高原地区淤地坝拦蓄泥沙及淤积形成的坝地是陆地生态系统重要的碳吸收汇之一。碳储存主要体现在淤地坝淤积土壤和作物生长两个方面。众多学者通过土壤有机碳来研究淤地坝对陆地碳贮存,而土壤粒径与土壤有机碳的关系研究的较少。

分形理论为解决土壤形态、过程等复杂问题方面提供了一种有效的定量化方法。基于土壤颗粒的分形理论广泛的应用于土地利用类型、土壤肥力、土壤沙化对土壤质地的影响研究上^[4-7]。目前泥沙颗粒的分形特征已成为土壤侵蚀研究的热点内容,众多学者在这方面做了大量的研究^[8-9]。但是对淤地坝内由于各种侵蚀力形成的旋迴层的土壤颗粒分形特征研究还较少。本文拟通过研究黄土高原典型小流域坝地

淤积泥沙颗粒的分形特征、剖面分布规律、泥沙颗粒与有机碳的关系以及进入淤地坝的淤积泥沙颗粒粒径的变化,揭示人类活动对水土流失的影响,以期为黄土高原生态建设提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王茂沟流域是绥德县韭园沟中游左岸的一条支沟,位于东经 110°20′26″—110°22′46″,北纬 37°34′13″—37°36′03″,海拔高度 940~1 188 m,流域面积 5.97 km²,主沟长 3.75 km,沟道平均比降为 2.7%,沟谷地面积 2.97 km²,占流域总面积的 46.7%,沟壑密度 4.3 km/km²,地面坡度一般在 20°以上。该流域属于半干旱地区,雨量年内分布不均,汛期(6—9 月)多暴雨,多年平均年降水量为 513 mm,汛期降水一般占年降水总量的 70%以上,水土流失严重。流域从 1953 年开展水土保持工作,到 1999 年底兴修水平梯田 112.47 hm²,造林 199.96 hm²,种草 27.25 hm²,坝地 25.16 hm²,总治理面积 367.81 hm²,治理程度为 61.61%。截至 2014 年,王茂沟小流域共有淤地坝 23 座,其中大型坝 2 座,中型坝 7 座,小型坝 14 座,淤地坝现状见表 1。

表 1 王茂沟淤地坝现状表

坝名	类型	修建年份	坝高/m	控制面积/km ²	淤地面积/hm ²	泥面平均高程/m
王茂沟 1#坝	骨干坝	1953	19.8	2.89	3.32	950.09
王茂沟 2#坝	骨干坝	1959	30	2.97	4.04	989.79
黄柏沟 2#坝	中型坝	1956	15	0.18	0.47	992.73
康河沟 2#坝	中型坝	1960	16.5	0.32	0.40	1003.60
马地嘴坝	中型坝	1959	8	0.50	1.23	998.26
关地沟 1#坝	中型坝	1976	23	1.14	2.81	1012.58
死地嘴 1#坝	中型坝	1959	8.9	0.62	3.02	1014.31
黄柏沟 1#坝	小型坝	1955	13	0.34	0.24	978.95
康河沟 1#坝	小型坝	1960	12	0.06	0.28	990.72
康河沟 3#坝	小型坝	1959	10.5	0.25	0.33	1013.88
埝堰沟 1#坝	中型坝	1955	13.5	0.86	0.97	993.68
埝堰沟 2#坝	小型坝	1955	6.5	0.18	1.98	999.89
埝堰沟 3#坝	小型坝	1956	9.5	0.46	1.37	1005.53
埝堰沟 4#坝	小型坝	1960	13.2	0.24	0.57	1018.22
麻圪凹坝	小型坝	1960	12	0.16	0.71	1011.67
何家峁坝	小型坝	1972	5.2	0.07	0.42	991.44
死地嘴 2#坝	小型坝	1959	16	0.14	2.58	1029.93
王塔沟 1#坝	小型坝	1956	8	0.35	0.64	1037.86
王塔沟 2#坝	小型坝	1968	4	0.29	0.63	1041.45
关地沟 2#坝	小型坝	1959	10.5	0.10	0.24	1021.18
关地沟 3#坝	小型坝	1959	12	0.05	0.24	1030.77
关地沟 4#坝	中型坝	2004	13.9	0.40	3.05	1030.87
背塔沟坝	小型坝	1959	13.2	0.20	0.94	1034.66

1.2 土壤样品采集与测定

2013 年 8 月在研究区进行了坝地淤积层剖面的

取样,沿坝地中泓线在坝前、坝中、坝后三个位置,用直径 5 cm 的土钻进行土壤样品的采集,共计采样点

47 个,土样 940 个。每个位置采集深度为 200 cm,每隔 10 cm 采集土样,共采集 20 层土壤样品,带回土壤化学实验室进行分析。采样的同时进行 GPS 的定位,记录样点位置信息。

(1) 土壤含水量用铝盒烘干法(105℃下烘 6~8 h)测定。

(2) 所有取回的土样经过自然风干,过 2 mm 筛子,去根,称取土样约 0.5 g,加 30%过氧化氢(H₂O₂)后浸泡 24 h 以去除有机质,加蒸馏水稀释,静置,除上清液以除酸,超声波处理 30 s 后用激光粒度仪 Mastersizer2000 测量土壤粒径的体积百分比。粒径分别设为 2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm,0.25~0.1 mm,0.1~0.05 mm,0.05~0.002 mm,<0.002 mm 共 7 级。根据美国制分类标准分为极粗砂粒(2~1 mm)、中粗砂粒(1~0.25 mm)、细砂粒(0.25~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)。

(3) 土壤总有机碳利用德国耶拿 TOC/TN 分析仪测定,步骤如下:将野外采回的土壤,阴凉处风干,将风干后的土壤过 1 mm 尼龙筛备用。称取 0.1 g 过 1 mm 筛的土壤样品与取样舟内,滴入 0.1 mol/L 的盐酸 1~2 滴,充分润湿样品。将已经准备好的取样舟放入烘箱中,以 105℃烘 4 h,取出静置 12 h 后在测定土壤有机碳。

1.3 分形维数模型

本文采用杨培岭等^[10]推导出的模型计算土壤颗粒分形维数:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D}=\frac{W(\delta<\bar{d}_i)}{W_0}$$

(1)

表 2 研究区淤地坝淤积剖面土壤各粒径含量的描述统计 %

质地	平均值	中位数	标准差	CV	方差	最小值	最大值
黏粒	6.84	6.68	1.18	17.25	1.39	2.62	15.26
粉粒	63.22	63.37	6.45	10.20	41.60	39.64	85.90
砂粒	29.94	29.89	7.34	24.52	53.88	3.38	57.74

2.2 坝地土壤颗粒的分形特征

在淤地坝坝地土壤粒径组成上,淤积剖面土壤粒径以粉粒(0.05~0.002 mm)为主,占 62.95%左右,然后依次为极细砂粒(0.1~0.05 mm)、黏粒(<0.002 mm)、细砂粒(0.25~0.1 mm)、中砂粒(0.5~0.25 mm),粗泥沙(粒径>0.05 mm)含量约占 30.27%。在垂直方向上,坝地的淤积泥沙表现为:粗细相间分布,从上到下依次为细、粗、细、粗的分布规律;在水平方向上,粗泥沙含量坝中>坝后>坝前,分别为 31.47%,30.81%,28.52%,从总体上看,坝中和坝后的泥沙相差并不大,但是跟坝前相比,坝前粗泥沙含量有一个明显

$$D=3-\lg\left[\frac{W(\delta<\bar{d}_i)}{W_0}\right]/\lg\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}$$

(2)

式中: \bar{d}_i ——两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值, ($d_i>d_{i+1}, i=1,2,\cdots$); \bar{d}_{\max} ——最大粒径土粒的平均值(mm); $W(\delta<\bar{d}_i)$ ——大于 d_i 的累积土粒重量; W_0 ——土壤各粒级重量的总和。其计算过程为:首先求出土壤样品不同粒径(d_i)的 $\lg\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}$ 和 $\lg\left[\frac{W(\delta<\bar{d}_i)}{W_0}\right]$ 值;然后以前者为横坐标,后者为纵坐标,使用最小二乘法进行直线拟合,计算其斜率,最后由斜率推算得到分维数 D 。

1.4 数据处理

样本的描述性分析和相关分析采用 SPSS 19.0 软件进行,统计特征值包括平均值、方差、标准差、变异系数等。土壤颗粒分形维数、质地粗化度采用 Excel 2007 计算。

2 结果与分析

2.1 淤地坝淤积剖面土壤的统计特征

根据研究区淤地坝淤积剖面土壤各粒径的描述统计(表 2)可以看出,粉粒含量占主导地位,粉粒含量百分比在 39.64%~85.90%,平均值为 63.22%;砂粒含量次之,砂粒含量百分比在 3.38%~57.74%,平均值为 29.94%;黏粒含量最少,黏粒含量百分比在 2.62%~15.26%,平均值为 6.84%。各粒径在整个剖面的变异系数大小依次为砂粒>黏粒>粉粒。根据 Nielson 和 Bouma(1985)的分类系统:弱变异 $CV\leq 10\%$,中等变异 $10\%<CV<100\%$,强变异 $CV\geq 100\%$,说明淤地坝淤积剖面粉粒、黏粒、砂粒均为中等变异。

表 2 研究区淤地坝淤积剖面土壤各粒径含量的描述统计 %

质地	平均值	中位数	标准差	CV	方差	最小值	最大值
黏粒	6.84	6.68	1.18	17.25	1.39	2.62	15.26
粉粒	63.22	63.37	6.45	10.20	41.60	39.64	85.90
砂粒	29.94	29.89	7.34	24.52	53.88	3.38	57.74

的降低,这表现为上游较粗,下游较细。

分形维数的大小与土壤质地密切相关,随着土壤粉粒和黏粒百分比增大,分形维数逐渐增大;随着土壤砂粒的百分含量增大,分形维数逐渐变小。土壤颗粒粒径的大小对土壤颗粒间的结合、孔隙的大小、数量及几何形态都起着决定的作用。土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,在分形维数上表现出为黏粒含量越高、质地越细,分形维数越高,土壤砂粒含量越高,其分形维数越低,同时单一粒级的集中程度对分形维数的数值也会产生重要影响^[11]。通过对王茂沟坝地 0—200 cm 土层土壤分形维数(D)计算

(图 1), 坝地土壤各土层的分形维数在 2.674~2.829, 这表明土壤质量比较好, 因为较高分形维数对应着较高的土壤质量。坝前、坝中、坝后土壤颗粒分形维数分别为 2.803 3、2.783 6、2.795 8, 即: 坝中<坝后<坝前, 这说明上游泥沙粗, 下游泥沙细。

2.3 坝地土壤颗粒的粗化度

坝地土壤颗粒组成的粒径主要以 0.1~0.05 mm 和 0.05~0.002 mm 为主, 这说明径流对于坡面上土粒的冲刷作用具有一定的分选性。一般的侵蚀性降雨都能将极细砂粒和粉粒从坡面冲刷下来, 进而搬运至淤地坝坝中沉积下来。正因为土壤侵蚀会引起土壤粒径的分选, 采用土壤质地粗化度^[12]可以说明侵蚀后土壤颗粒组成的变化, 即: 石砾和砂粒含量之和(>0.05 mm)与粉粒和黏粒含量之和(<0.05 mm)的比值。(本文对砾、砂、粉、黏粒的划分采用美

国制)土壤质地粗化度值越大, 粗颗粒在土壤机械组成中越多; 土壤质地粗化度值越小, 粗颗粒在土壤机械组成中越少, 表现为土壤受侵蚀的程度越大。由图 2 可知: 王茂沟坝地土壤质地粗化度在 0.27~0.58, 平均值为 0.44, 坝前(0.40)<坝后(0.45)<坝中(0.46), 即颗粒组成上游到下游有一个逐渐变粗的趋势, 该流域淤地坝内沉积泥沙的 70% 来源于沟间地, 30% 来源于沟谷地^[13]。因为黄土高原支离破碎的景观格局导致坝地淤积泥沙颗粒的组成和分布相当复杂, 但是大多数来自沟间地的泥沙在沟道中沉积遵循一个普遍的规律: 粗颗粒先逐渐沉积, 细颗粒随着水流沿着沟道向下游流动的时候逐渐沉积, 表现为上游到下游逐渐变细的过程和坝内泥沙水平位移轨迹, 但是大多数坝地的面积很小和人为耕作的影响, 泥沙在淤地坝内沉积分选规律不是特别明显。

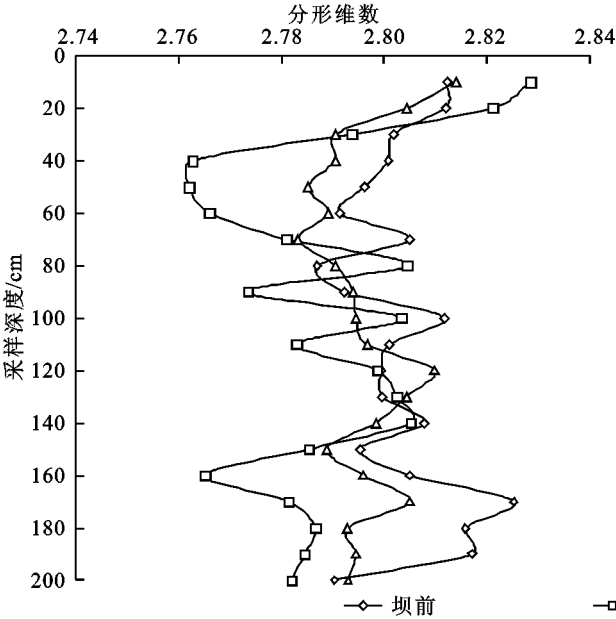


图 1 王茂沟坝系土壤颗粒分形维数垂直变化

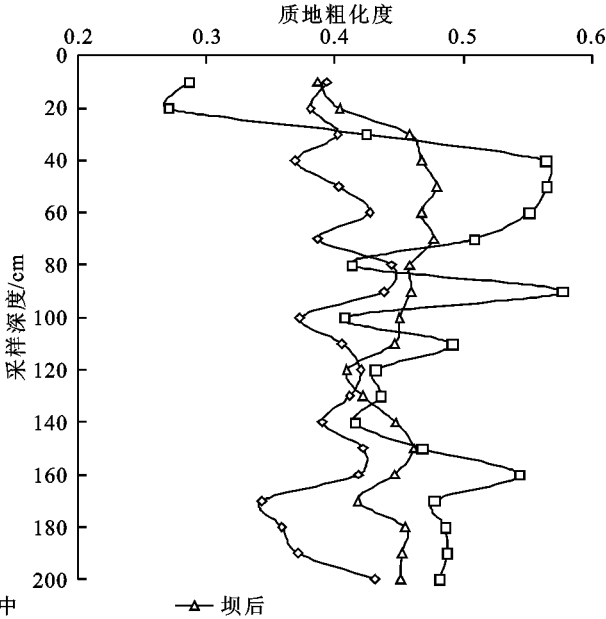


图 2 王茂沟坝系土壤质地粗化度垂直变化

2.4 分形维数、有机碳与土壤机械组成的关系

由表 3 可见, 坝地土壤颗粒在 0.05~0.002 mm 和<0.002 mm 范围与土壤颗粒的分形维数呈极显

著正相关, 在 2.0~1.0 mm, 1.0~0.5 mm, 0.5~0.25 mm, 0.25~0.1 mm, 0.1~0.05 mm 范围与土壤颗粒的分形维数呈极显著负相关。

表 3 土壤颗粒机械组成与分形维数、有机碳的关系

指标	粒径/mm						
	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.002	<0.002
分形维数	-0.498**	-0.756**	-0.571**	-0.665**	-0.435**	0.782**	0.717**
有机碳	-0.048	0.046	0.038	-0.570**	-0.680**	0.652**	0.358**

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

对表 1 中分形维数 D 和各粒级含量 X 进行回归分析, 得出的关系式如表 4 所示。

由以上分析可得, 以 0.05 mm 为临界点分析, <0.05 mm 粒径平均含量为 69.73%, >0.05 mm 粒

级平均含量为 30.27%, 对<0.05 mm 和>0.05 mm 粒级含量与分形维数进行回归分析, 发现<0.05 mm 粒级范围与分形维数呈极显著正相关, >0.05 mm 粒级范围与分形维数呈极显著负相关, 其关系式分别为:

$D=0.006X+2.378, D=-0.006X+2.975$

在 $<0.05\text{ mm}$ 粒级范围,粒级含量越高,分形维数越大; $>0.05\text{ mm}$ 粒级范围,粒径含量越高,分形维数越小。

表 4 分形维数与各粒径的回归分析

粒径/mm	回归方程	R^2
2.0~1.0	$D=-0.017X+2.797$	0.25
1.0~0.5	$D=-0.025X+2.797$	0.57
0.5~0.25	$D=-0.096X+2.806$	0.33
0.25~0.1	$D=-0.015X+2.881$	0.44
0.1~0.05	$D=-0.005X+2.909$	0.19
0.05~0.002	$D=0.006X+2.393$	0.61
<0.002	$D=0.036X+2.548$	0.52

随着土壤剖面的深度增加,土壤有机碳含量和粒级含量的变化关系比较复杂,没有明显的规律性。从统计学角度上来说,以 0.25 mm 和 0.05 mm 为界,有机碳与 $<0.25\text{ mm}$ 各粒径含量没有相关关系,与 $0.05<X<0.25\text{ mm}$ 各粒径呈极显著负相关,与 $<0.05\text{ mm}$ 各粒径呈极显著正相关。从表层到深层,土壤有机碳与不同粒径的关系在 $0.25\sim0.1\text{ mm}, 0.1\sim0.05\text{ mm}, 0.05\sim0.002\text{ mm}, <0.002\text{ mm}$ 这4个粒径上最明显。这说明坝地土壤有机碳与粉粒和黏粒含量呈正相关,与细砂粒和极细沙粒含量呈负相关,这与我国其它地方土壤的研究结果^[14-15]一致。坝地土壤中粉粒和黏粒的粒径小,它是无机胶体,有机碳是有机胶体,二者很容易结合形成无机—有机胶体。这可能是坝地土壤有机碳的含量与黏粒和粉粒含量呈显著相关的关系的主要原因,土壤中黏粒、粉粒含量愈高,土壤中有机碳的含量也愈高。

3 结论

- (1) 王茂沟坝地土壤颗粒分形维数变化于2.674~2.829,垂直剖面变化微小,水平方向上坝后 $<$ 坝前;
- (2) 王茂沟坝地土壤质地粗化度在0.27~0.58,平均值为0.44,坝前 $<$ 坝后 $<$ 坝中;
- (3) 坝地土壤颗粒分形维数与小于 0.05 mm 细颗粒含量呈极显著正相关,与大于 0.05 mm 的粗颗粒呈极显著负相关;

- (4) 坝地土壤有机碳与粉粒和黏粒含量呈正相关,与细砂粒和极细沙粒含量呈负相关。

参考文献:

[1] 倪晋仁,韩鹏,张仁. 黄河中游水保措施对入黄干支流泥沙特性的影响: I. 泥沙粒径变化[J]. 自然资源学报, 1997,12(1):1-9.

[2] Kern J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States [J]. Soil Science Society of America Journal,1994,58(2):439-455.

[3] 李勇,白玲玉. 黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J]. 水土保持学报,2003,17(2):1-4.

[4] 董莉丽,郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):35-41

[5] 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分形特征[J]. 农业工程学报,2009,25(9):74-78.

[6] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤颗粒及分形特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(5):29-35.

[7] 弥智娟,穆兴民,赵广举. 黄土高原水蚀风蚀交错区小流域泥沙粒径的分形分析[J]. 水土保持研究,2014,21(1):12-17.

[8] 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):3081-3089.

[9] 宋利珍,常庆瑞. 秦巴山区不同地貌类型土地利用分形研究[J]. 江西农业学报,2011,23(10):154-157.

[10] 杨培岭,罗元培,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.

[11] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展,1994,22(1):1-10.

[12] 张燕,彭补拙,高翔,等. 人类干扰对土壤侵蚀及土壤质量的影响:以苏南宜兴低山丘陵区为例[J]. 地理科学, 2002,22(3):336-341.

[13] 李勉,杨剑锋,侯建才,等. 黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J]. 农业工程学报,2008,24(2):64-69.

[14] 王洪杰,李宪文,史学正,等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报,2003,17(2):44-50.

[15] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等. 粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系[J]. 中国农业科学, 2002,35(3):279-302.