

黄土高原水蚀风蚀交错区小流域泥沙粒径的分形分析

弥智娟¹, 穆兴民^{2,3}, 赵广举^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:泥沙颗粒特征是表征泥沙表面形态、泥沙机械组成、排列模式及泥沙絮凝现象的主要物理属性之一。在水土流失严重的水蚀风蚀交错区,不同地表覆被类型的侵蚀产沙方式和粗泥沙的侵蚀产沙强度很不均衡,导致其泥沙粒径分布的差异很大。以黄土高原典型淤地坝为例,采用分形原理和多重分形理论研究淤地坝坝控小流域泥沙粒径的分形特征,结果表明:淤地坝坝内泥沙与坡面泥沙存在线性关系,相关系数高达 0.93;泥沙粒径分形维数 D 在淤地坝坝内垂直方向上随泥沙颗粒的增大而减小;分形的 5 个特征参数 $D, D(0), D(1), D(2), D(0)/D(1)$ 均表明不同地表覆被类型下,草地的粒度分布较均匀,裸地次之,分布最狭窄的是砂岩,该结果可为小流域泥沙来源和水土保持治理措施提供重要依据。

关键词:淤地坝; 泥沙粒径; 分形维数; 多重分形; 黄土高原

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)01-0012-06

Multifractal Analysis of Sediment Grain Size in a Small Watershed of Water-wind Erosion Crisscross Region on the Loess Plateau

MI Zhi-juan¹, MU Xing-min^{2,3}, ZHAO Guang-ju^{2,3}

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Grain size is one of the most important physical attributes due to its influence on sediment properties related to surface morphology of sediment, the mechanical composition of sediment, the arrangement of grains and flocculation of cohesive of sediment. So in the water-wind erosion crisscross region, ways of sediment generation have strong discrepancy with different patterns of surface cover, which lead to the differences in grain size distribution. In this paper, special dam on the Loess Plateau was taken as an example. The fractal dimension and multifractal theory were applied to study the fractal characteristics of grain size distribution in the checkdam and potential sediment sources. The results show that a good linear relationship between the sediment deriving from the slope and the sediment which deposited in the checkdam were found. Fractal dimension (D) in the checkdam decrease with the increase of sediment particles in the vertical direction. The same result is reflected by the five parameters such as $D, D(0), D(1), D(2), D(0)/D(1)$. Under different types of surface cover, the grain size distribution of the grassland is uniform, bare land is the secondary, and the most narrow distribution is observed in sandstone. So the grassland, bare land and sandstone can allow the determination of sediment sources. Our results could be used to study the sediment source of small watershed and provide an important basis with soil and water conservation.

Key words: checkdam; sediment size; fractal dimension; multifractal characteristics; Loess Plateau

收稿日期: 2013-11-12

修回日期: 2013-12-30

资助项目: 中国科学院重点部署项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04); 国家自然科学基金“皇甫川流域泥沙来源的复合指纹示踪研究”(41201266); 中国科学院 2011 年西部之光项目“气候变化与人类活动对皇甫川水沙变化贡献的定量评价”(2011ZD03)

作者简介: 弥智娟(1987—), 女, 陕西蒲城人, 硕士研究生, 研究方向: 生态水文、水土保持研究。E-mail: mzh_sh@163.com

通信作者: 穆兴民(1961—), 男, 陕西华阴人, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态水文、水土保持研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

黄土高原水蚀风蚀交错区生态环境极其脆弱,是水土流失最严重的地区及多沙粗沙的主要产区,也是黄河下游粗泥沙的主要来源区^[1],淤地坝水土保持措施快速拦截了进入下游河道的泥沙,为减少入黄泥沙发挥了重要作用,坝内淤积泥沙可反映坝控范围内的泥沙侵蚀、输移和沉积情况。泥沙粒径是研究泥沙输移规律中必不可少的参数^[2],也是研究淤地坝侵蚀产沙环境的重要指标之一。由于该区域地表物质松散,植被稀疏,地形、地貌复杂及终年强烈的水蚀风蚀交替作用使淤地坝对不同粒径级泥沙的减沙效益和各粒径级泥沙的产沙量十分不均衡,导致泥沙颗粒物呈现明显的不规则性和粗糙性。泥沙颗粒的粒径是河流泥沙的重要几何特征,分形几何学的创立为准确地描述非规则的几何形态提供了重要工具^[3],因此在黄土高原水蚀风蚀交错区开展利用分形几何原理来研究泥沙机械组成及级配具有重要的意义。目前,泥沙颗粒物表面存在分形特征已经成为各研究学者的共识^[4],众多学者在这方面做了大量工作。Gui 等^[5]、文星跃等^[6]采用分形维数阐释小流域土壤粒径分布 (particle size distribution, PSD) 及其变化规律; Posadas 等^[7]、王德等^[8]、李进峰等^[9]研究了不同土地利用类型下多重分形维数与地表土壤侵蚀的关系; 宋利珍等^[10]、宋孝玉等^[11]研究了不同地貌、不同土地利用方式的土壤粒径分形特征,另外 Zhao 等^[12]、武生智等^[13]等利用 Weibull 模型阐述小流域泥沙粒径的分形特征。但是对淤地坝内泥沙由于不同侵蚀营力(降雨,风力)而形成的沉积旋廻,其明显的泥沙粒径分层排列分布、泥沙颗粒的形状和表面不同土壤质地呈现的分形特征,该方面深入研究较少。

因此,本文利用分形原理及多重分形理论研究淤地坝泥沙在不同地表覆被类型下的分形特征,探讨坝控小流域泥沙粒径特征,为黄土高原水蚀风蚀交错区的水土保持治理及减少入黄泥沙提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古准格尔旗境内的小石拉塔沟,处在皇甫川流域干流上,地理坐标为 39°31'40"N, 110°57'23"E,海拔 833~1 482 m;淤地坝控制面积为 0.6 km²。据实地访问调查,淤地坝于 1958 年由人工夯实建成,1973 年在暴雨中冲毁,坝区无任何泄洪设施,属于典型的“闷葫芦坝”。流域处于黄土高原水蚀风蚀交错区,包含黄土丘陵、砂质丘陵、砾质丘陵三个亚地貌类型,其中红色和青色砒砂岩,手捏即碎,遇水迅速崩解,抗蚀性差且分布最广。流域内多年平均降水量为 379 mm^[14],雨季多在 6—9 月,占全年降水量的 80%以上,最大降水月份出现在 7 月,降雨多以暴雨的形式出现。

2 材料与方法

2.1 样品采集

淤地坝共采集 86 个样品,采样于 2012 年 11 月完成。根据淤地坝沉积旋廻层理论及现场踏勘调查,淤地坝坝内剖面采样点选在距坝址 30 m 处。其中,淤地坝坝高 9.9 m,野外工作时一部分利用水毁时形成的断面,另一部分在断面取样剖面垂直部位下挖 3 m 直达历史河床。根据淤地坝沉积旋廻层厚度,由上到下分 31 层共取 65 个样品。

由于在小石拉塔沟坝控小流域内,坡面地表覆被主要是未被利用的裸地、草地和砂岩,针对该区域的表层不同覆被类型和区域水土流失强度,采样时去掉表层 2~3 cm 的表层枯落物,根据四分法采取样点处 5—10 cm 深度的样品 100 g,混合袋装,共采集 21 个坡面样品,其中裸地样品 4 个,草地样品 5 个,砂岩样品 4 个,沟内泥沙样品 8 个。

2.2 泥沙粒度测定

样品经室内自然风干后,过 2 mm 的筛子,剔除杂草及根系。称取样品 3~5 g,放入 100 ml 的烧杯中,加 30% 过氧化氢 (H₂O₂) 溶液,沙浴煮沸使其充分反应以致有机质完全分解;之后再加入 10 ml 浓度为 10% 的盐酸 (HCl) 沙浴煮沸,去除样品中的碳酸盐;注入超纯水稀释,静置,除上清液以达到除酸的目的,反复静置直至溶液呈中性;然后加入六偏磷酸钠 (NaPO₃)₆ 分散剂,超声 30 s 后,加入样品至遮光度达 20%~25%,用激光粒度仪 Mastersizer 2000 测量泥沙粒径的体积百分比。

激光粒度仪测定的粒径范围是 0~2 mm,泥沙粒径分级以国际制为标准,即 0~0.002 mm 为黏粒,0.002~0.02 mm 为粉粒,0.02~2 mm 为砂粒。

2.3 粒径分形原理

分形维数 D 能够定量刻画粒径分形特征,可反映地表土壤(泥沙)的复杂度及破碎度。根据 Tyler 等^[15]建立的三维空间的体积分维基本原理经转化后可得分形维数 D 公式:

$$\lg\left[\frac{V(r < R_i)}{V_T}\right] = (3-D)\lg\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right) \quad (1)$$

式中: V ——粒径 r 小于某一特征尺度 R_i 的土壤颗粒累积体积百分含量(%); V_T ——土壤颗粒总体积百分含量(%); R_{\max} ——测量范围的最大粒径(2 mm)。

2.4 多重分形原理

多重分形维数可以更精确地反映数据集的分布情况,从而成为描述分形体的有力工具。目前最为常用的是盒维数,就是用尺度为 σ 的相等“盒子”对整个粒径分布跨度进行划分,盒子总数为 N ,每个盒子的

体积百分数 P_i , 且 $\sum_{i=1}^N P_i = 1$, 其计算公式为^[16-17]

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \times \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\lg[\sum_{i=1}^{N(\sigma)} P_i(\sigma)^q]}{\lg \sigma} \quad q \neq 1 \quad (2)$$

$$D(q) = \frac{\sum_{i=1}^{N(\sigma)} P_i(\sigma) \lg P_i(\sigma)}{\lg \sigma} \quad q = 1 \quad (3)$$

式中: q ——从不同层次上提取系统信息的参量。多重分形的数据一般要求归一化到 1 或 100%, q 从不同层次上扫描不同浓度的区域^[17-18]。当 $q=0$ 时, $D(q)$ 为经典的计盒分形维数, 提供土壤粒径分布的最基本信息; 当 $q=1$ 时, $D(1)$ 为信息维, 提供了土壤颗粒不均匀度或异质性的信息, $D(1)$ 越接近 1 时, 表明在整个研究尺度上分布越均匀^[17]; 当 $q=2$ 时, $D(q)$ 为关联维数 $D(2)$ 。多重分形的这 3 个参数为描述客观存在的复杂不规则体提供理论依据。

3 结果与分析

3.1 淤地坝泥沙不同粒径含量的剖面分布

不同外营力下侵蚀的泥沙经淤地坝拦截后, 使沉

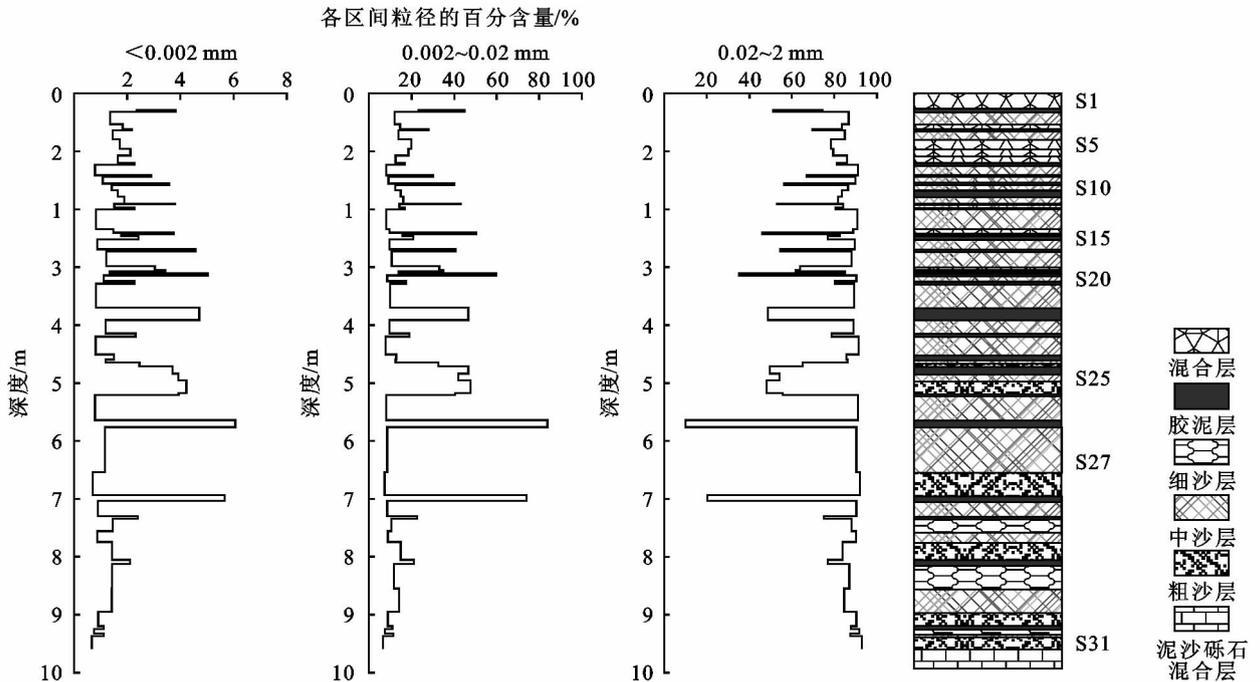


图 1 坝内泥沙粒径的剖面分布

3.2 淤地坝泥沙粒径分形维数

坝内泥沙与坡面泥沙的分形维数反映淤地坝对坡面来沙的分选性。根据国际制分类标准, 将研究区域泥沙分为黏粒、粉粒、砂粒三类, 分析土壤质地三相图(图 2a, 图 3a), 坝内泥沙土壤质地类型涉及砂土、壤砂土、砂壤土、粉砂壤土、粉砂土 5 种。坝内泥沙在砂粒轴上 $[0, 100\%]$ 区间上均有分布, 且在小于 $0.10 \mu\text{m}$ 范围亦有分布; 而坡面泥沙在砂粒轴上仅分布在

积物在垂直方向上形成厚度不同、泥沙粗细差异明显的层次, 表现出上细下粗的规律, 从上到下由细到粗即为一个完整的旋廻, 旋廻与旋廻之间分层清晰。

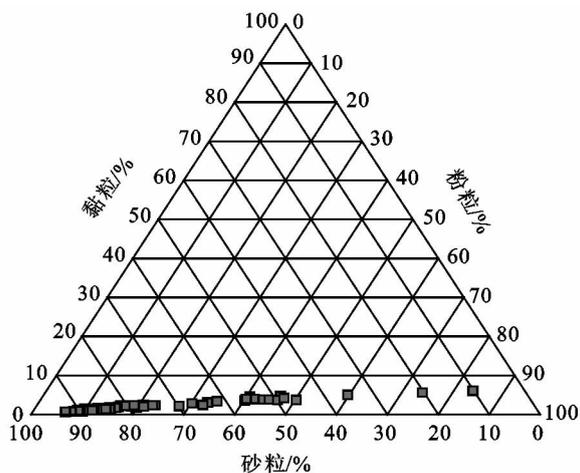
分析图 1, 可得该典型淤地坝剖面共分 31 个旋廻层。一个完整的旋廻可由各区间粒径百分含量分析得出。从小粒径区间粒径百分含量最多开始到小粒径区间粒径百分含量逐渐减少到一定程度便开始突增为止即为一个完整旋廻, 该过程大粒径区间则以相反的趋势变化, 如第 27 层 ($5.76 \text{ m} \sim 6.94 \text{ m}$) 可明显得出从小粒径区间 ($< 0.002 \text{ mm}$ 和 $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$) 为主的胶泥层开始, 到深度 7 m 左右的小粒径区间含量突增之前的粗沙层为止是一个完整旋廻。该方法与取样时划分层次完全吻合, 其中第 27 层、第 29 层和第 30 层泥沙淤积较厚, 表明这些层产沙量较多, 这应该是年内较强的几场暴雨引起的。第 1 层、第 3 层、第 5 层、第 6 层、第 7 层、第 14 层和第 18 层均为混合层, 这应该为一次暴雨产生侵蚀淤积后, 紧随其后的另一场暴雨再次发生侵蚀, 如此数次扰动所致泥沙颗粒混合淤积的结果。

区间 $[60\%, 100\%]$, 土壤质地分布种数较少, 且在小于 $0.36 \mu\text{m}$ 区间无泥沙颗粒分布, 说明坡面采样找不到完全是细小颗粒的样品, 而淤地坝拦截的是多种因素作用进入沟道的泥沙可在坝内无连续外力扰动时分颗粒依次沉降形成上细下粗的完整旋廻。

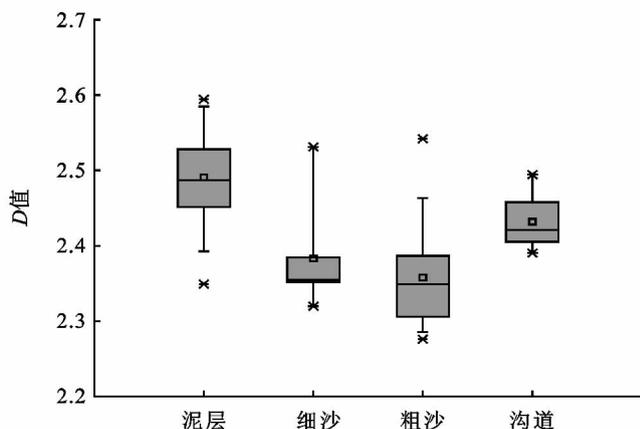
坝内泥沙 D 值说明了不同颗粒区段泥沙在坝内的分层排列方式。根据公式(1)对坝内泥沙进行分形计算, 其 D 值变化于 $2.28 \sim 2.59$ 之间, 而且在同一

垂直剖面的旋迴层泥沙中,随着泥沙粒径的增大而 D 值却在逐渐减小,即 $D_{\text{泥层}} > D_{\text{沟道}} > D_{\text{细沙}} > D_{\text{粗沙}}$ 。泥层中的 D 值最小值比其他的最大值均大,沟道中泥

沙的 D 值处于泥层、细沙、粗沙三者平均水平(图 2b),亦即沟道中的泥沙处于泥沙汇聚与进入淤地坝库区的过渡阶段。



a 坝内泥沙三相图

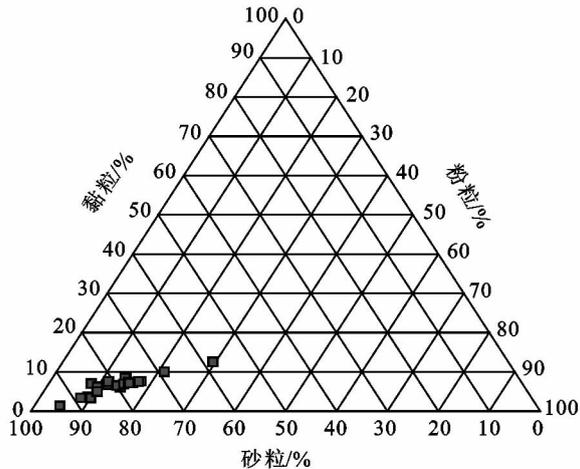


b 旋迴层内泥沙粒径分形维数分布

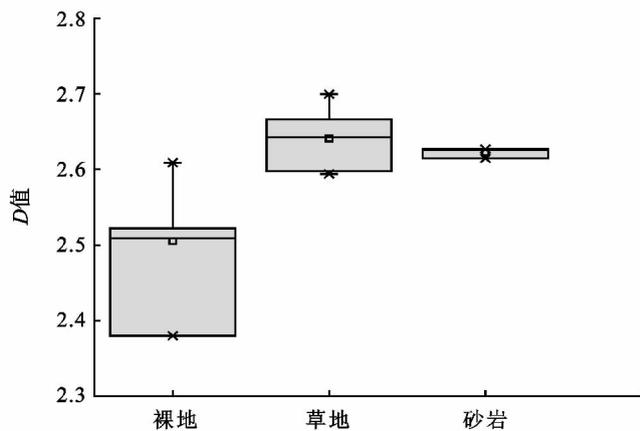
图 2 坝内泥沙的分形分析

坝控小流域地表覆被类型的 D 值之间差异较大。因坡面和沟道是小流域侵蚀产沙的主要源地,又是控制水土流失,恢复与重建生态环境的基本治理单元^[19],故对坡面泥沙按不同的地表覆被类型分为裸地、草地和砂岩。根据公式(1)对坡面泥沙的分形计

算,可得 D 值为 2.38~2.70,其不同覆被类型泥沙粒径分形维数差距也较大(图 3b),即 $D_{\text{草地}} > D_{\text{砂岩}} > D_{\text{裸地}}$,裸地的最大值比草地和砂岩的最小值还小,表明地表覆被类型可影响泥沙粒径分形维数分布,从而可以确定不同地表覆被类型对土壤侵蚀程度的影响。



a 坡面泥沙三相图



b 不同覆被泥沙粒径分形维数分布

图 3 坡面泥沙的分形分析

3.3 淤地坝坝控流域泥沙粒径的分形特征

淤地坝坝内泥沙与坡面泥沙不同泥沙粒径分级与 D 值之间具有相关关系。根据实验所得的数据,采用式(1)计算体积分形维数 D ,并对两种不同采样深度的样品进行相关性分析(图 4),其二者泥沙粒径的分布趋势较相似,相关系数最高可达 0.93,其中黏粒和粉粒区间均呈明显的正相关性,砂粒区间呈负相关性,表明以坡面内不同地表覆被作为来源区示踪淤地坝坝内泥沙,探究淤地坝的建库年限,从而反演淤地坝坝内泥沙来源及侵蚀产沙强度的工作是可行的。

分析坝内泥沙和坡面泥沙的中值粒径 $d(0.5)$,二者呈明显的负相关性,表明泥沙粒径大小可以作为研究泥沙来源的一个衡量指标来确定小流域泥沙来源。

3.4 淤地坝坝控流域泥沙多重分形维数的分形特征

多重分形采用多个测度标尺,研究不同尺度集合区域分形测度内坡面泥沙的空间分布。

根据多重分形的原理,取激光粒度仪的有效测量区间 $[0.1 \mu\text{m}, 2000 \mu\text{m}]$,在多重分形分析中, $r_i = [\varphi_i, \varphi_{i+1}] (i=1, 2, \dots, 64)$,划分时取样间隔为对数等差递增数列, $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 为 0.078 125,划分完 64 个

小区域粒径范围之后,需把区间经 $\varphi_j = \lg(\varphi_j/\varphi_1)$ ($j=1,2,\dots,65$)转换成粒径分布区间 $J=[0,5]$,以方便对激光粒度仪测量的数据区间进行划分。在区间 J 中,总共有 N 个相同尺寸的区间, $\sigma=5 \times 2^{-k}$ ($k=1,2,3,\dots,6$),即 σ 依据盒子的大小依次从大到小的取值为 2.5, 1.25, 0.625, 0.3125, 0.15625, 0.078125。由公式(2)可知, σ 越趋近于 0,所得值即为多重分形维数,故 σ 的取值越小越好,实际中 $k=6$ 时对分形体的划分已经能够满足需要。应用公式(2),(3)计算 q 在区间 $[-10,10]$ 且步长为 1 的多重

分形维数。图 5 是三个不同覆被类型的多重分形维数谱曲线,谱函数均是单调递减函数。对于均匀分形 $q-D(q)$ 是一条直线;对于非均匀分形, $q-D(q)$ 是有一定宽度的^[20-21]。由图 5 看出,该区域泥沙粒径分布为非均匀分形。由于信息维 $D(1)$ 表明了介质在区间内的均匀程度且 $D(1)$ 越大,泥沙在区域内每个区间都分配到,粒径分布就越均匀,由表 1 看出,该区域 $D_{草地} > D_{砂岩} > D_{裸地}$,即草地的粒径分布较均匀,且 $D(0)/D(1)$ 的值越小,粒度分布的区域越宽大,集中程度越差,显然同样得出草地的粒径分布较均匀的结论。

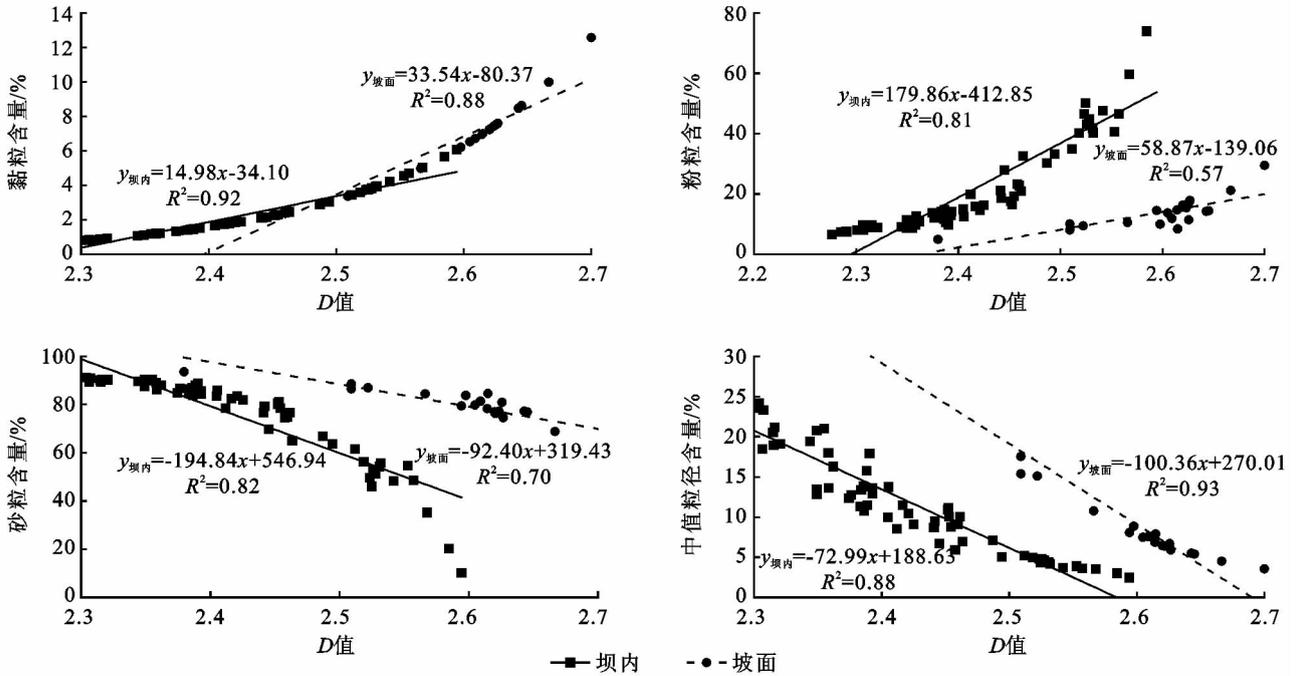


图 4 坝内与坡面不同泥沙粒径的关系

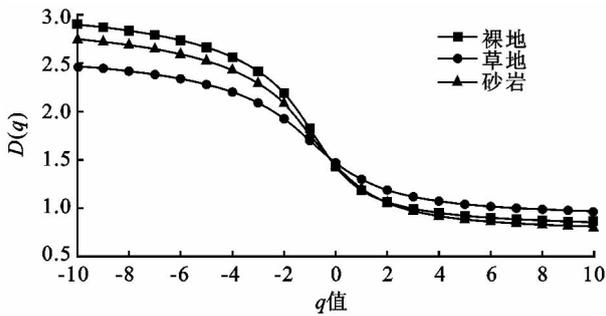


图 5 坡面泥沙的多重分形维数谱曲线

表 1 不同覆被类型下的分形特征参数

坡面样品	D	$D(0)$	$D(1)$	$D(2)$	$D(0)/D(1)$
裸地	2.5049	1.4314	1.1860	1.0617	1.2069
草地	2.6410	1.4694	1.2980	1.1881	1.1320
砂岩	2.6225	1.4428	1.2040	1.0549	1.1983

4 结论

(1) 淤地坝坝内上细下粗的明显旋迴层次表明

了泥沙在被淤地坝拦截后具有一定的分选性,淤地坝坝内泥沙无论土壤质地还是泥沙粒径级配都与坡面泥沙具有良好的线性关系,泥沙粒径分形维数 D 值在淤地坝坝内垂直剖面上随泥沙颗粒的增大而减小,即 $D_{泥层} > D_{沟道} > D_{细沙} > D_{粗沙}$,该信息可用于反演区域侵蚀产沙强度。

(2) $D, D(0), D(1), D(2), D(0)/D(1)$ 这五个参数表明在坡面上泥沙随下垫面覆被类型的变化而均匀程度不同,即 $D_{草地} > D_{砂岩} > D_{裸地}$,即草地的粒度分布最均匀,其次是砂岩,分布区间最狭窄的为裸地。该结果可为水蚀风蚀交错区不同地表覆被类型下的泥沙物理特性的深入研究提供基础数据,也为小流域水土保持治理提供科学依据。

参考文献:

[1] 查轩,唐克丽.水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J].自然资源学报,2000,15(1):97-100.
 [2] 倪晋仁,韩鹏,张仁.黄河中游水土保持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.
- [3] 王倩, 汪权方, 梅新. 分形理论在遥感图像分类处理中的应用评析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(7): 3325-3326.
- [4] 周银军, 陈立, 刘同宦. 分形理论在泥沙研究中的应用概述[J]. 泥沙研究, 2012(2): 73-80.
- [5] Gui D, Lei J, Zeng F, et al. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands: A case study of the Cele Oasis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11): 1306-1311.
- [6] 文星跃, 黄成敏, 黄风琴, 等. 岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2011(1): 80-86.
- [7] Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, et al. Multi-fractal characterization of soil particle-size distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(5): 1361-1367.
- [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] 李进峰, 宫渊波, 陈林武, 等. 广元市不同土地利用类型土壤的分形特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 167-182.
- [10] 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.
- [11] 宋孝玉, 李亚娟, 李怀有, 等. 不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 155-167.
- [12] Zhao P, Shao M, Omran W, et al. A modified model for estimating the full description of soil particle size distribution[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(1): 65-72.
- [13] 武生智, 魏春玲, 马崇武, 等. 沙粒粗糙度和粒径分布的分形特性[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1999, 35(1): 53-56.
- [14] 王向东, 谢树南, 陈海迟. 皇甫川流域产流产沙数学模型及水沙变化原因分析[J]. 泥沙研究, 1999(5): 56-66.
- [15] 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.
- [16] 苏维宜. 局部域上的调和分析与分形分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [17] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3): 305-315.
- [18] Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 1033-1041.
- [19] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J]. 水土保持通报, 1997, 17(3): 37-43.
- [20] Miranda J G V, Montero E, Alves M C, et al. Multi-fractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal[J]. Geoderma, 2006, 134(3): 373-385.
- [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.
- (上接第 11 页)
- [24] Binkley D, Fisher R. Ecology and Management of Forest Soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [25] López-Garrido R, Deurer M, Madejón E, et al. Tillage influence on biophysical soil properties: The example of a long-term tillage experiment under Mediterranean rainfed conditions in South Spain[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 118(1): 52-60.
- [26] Johansson M, Stenberg B, Torstensson L. Microbiological and chemical changes in two arable soils after long-term sludge amendments[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 30(1/2): 160-167.
- [27] Elhottová D, Szili-Kovács T, Triska J. Soil microbial community of abandoned sand fields[J]. Folia Microbiol, 2002, 47(4): 435-40.
- [28] 刘建国, 卞新民, 李彦斌. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1027-1032.
- [29] Du H D, Jiao J Y, Jia Y F, et al. Phytogenic mounds of four typical shoot architecture species at different slope gradients on the Loess Plateau of China[J]. Geomorphology, 2013, 193(7): 57-64.
- [30] 李海防, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 287-293.
- [31] 柴强, 黄鹏, 黄高宝. 间作对根际土壤微生物和酶活性的影响研究[J]. 草业学报, 2008, 19(8): 105-110.
- [32] Jiang J P, Xiong Y C, Jiang H M, et al. Soil microbial activity during secondary vegetation succession in semi-arid abandoned lands of Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2009, 19(6): 735-747.
- [33] Haack S K, Garchow H M, Klug J, et al. Analysis of factors affecting the accuracy, reproducibility, and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(4): 1458-1468.
- [34] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 2983-2997.