

# 黄土丘陵区小流域坝地沉积泥沙颗粒分布特征

申震洲<sup>1</sup>, 亢晨波<sup>2</sup>, 张宁宁<sup>2</sup>, 刘普灵<sup>3</sup>

(1.黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003;

2.榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**探讨黄土丘陵区新的侵蚀环境背景下小流域侵蚀泥沙的再分布特征,为开展和研究小流域土壤侵蚀及产沙过程提供理论依据。以黄土丘陵区典型淤地坝为研究对象,基于分形理论,通过分析淤地坝沉积泥沙垂直剖面的泥沙粒径组成变化及分形特征,研究了小流域坝前沉积泥沙再分布特征。结果显示:小流域坝地沉积泥沙剖面粒径由上到下依次呈现细—粗的周期分布规律,粗细分布的厚度差异较大,但整体上沉积层厚度随着沉积时间显著降低;沉积泥沙粒径以粗粉粒为主,平均百分含量为 51.73%,且坝地剖面各分层的分形维数分布范围介于 2.60~2.78;沉积泥沙粗化度变化范围介于 0.04~0.37,平均值为 0.16。研究表明随着退耕时间的增加,小流域沉积泥沙厚度显著降低,侵蚀泥沙的细颗粒物含量增加。

**关键词:**土壤侵蚀; 粒径组成; 分形理论; 淤地坝; 沉积旋回

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0001-06

## Profile Characteristics of Sediment Particle Size at Check Dam in Small Watershed of Loess Hilly Area

SHEN Zhenzhou<sup>1</sup>, KANG Chenbo<sup>2</sup>, ZHANG Ningning<sup>2</sup>, LIU Puling<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2.Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shanbei Mining Area, College of Life Science, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to provide the theoretical basis for the study of soil erosion and sediment yield in small watershed, the characteristics of sediment redistribution under the new erosion background were discussed. In this paper, special dam on the loess hilly area was taken as an example, the fractal dimension was applied to analyze the variation of grain size composition and fractal characteristics of sediment, and study the characteristics of sediment redistribution. The results show that: from top to bottom, the grain size of sediment profile in small watershed presents the periodic distribution law of fine-coarse, and the thickness of sediment layer varies greatly and decreases with the deposition time; the silt is the main coarse particle size, average percentage content of coarse particle is 51.73%; the fractal dimension distribution of each layer in the section of the dam is between 2.60 and 2.78; the coarseness of sediment varies from 0.04 to 0.37 with an average value of 0.16. The sediment thickness decreases and the amount of fine particulate matter in sediment increases in small watershed with the deposition time.

**Keywords:** soil erosion; particle size composition; fractal theory; silting dam; sedimentary rotation

收稿日期:2020-06-03

修回日期:2020-07-04

**资助项目:**水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放项目“黄土高原水蚀风蚀交错区典型小流域泥沙来源研究(201804)”；陕西省教育厅项目“基于复合指纹识别技术的黄土高原典型小流域泥沙来源研究(19JK1000)”；陕西省陕北矿区生态修复实验室开放基金“陕北矿区排土场边坡植被复垦对其土壤重构的空间调控(KFXM201807)”；国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区近十年来典型流域侵蚀环境演变的泥沙响应(41371281)”

**第一作者:**申震洲(1980—),男,河南汤阴人,博士,教授级高工,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:zzsh80@163.com

**通信作者:**张宁宁(1986—),女,山西长治人,博士,讲师,主要从事小流域土壤侵蚀研究。E-mail:zhangningning1986@163.com

土壤侵蚀是全世界所面临的头号环境问题<sup>[1]</sup>。黄土丘陵区由于沟壑纵横、沟深坡陡的复杂地形地貌条件,导致该地区水土流失范围广、面积大、土壤侵蚀严重,侵蚀的泥沙成为黄河泥沙的主要来源<sup>[2]</sup>,进而导致生态失衡,旱涝灾祸频发。为保障黄河安全,改善生态环境,以小流域为侵蚀单元进行的小流域综合治理措施成为黄土高原土壤侵蚀治理的重要手段<sup>[3]</sup>,而淤地坝是其中一项成效显著的土壤侵蚀治理工程措施,它在拦泥、滞洪、淤沙造田等方面起着重要作用<sup>[4-5]</sup>。坝地系统所拦蓄泥沙颗粒赋存了大量土壤侵蚀产沙过程及侵蚀环境演替的相关信息,是研究小流域土壤侵蚀变化特征及反演侵蚀环境变化的良好载体,为研究小流域土壤侵蚀提供了新的途径<sup>[6-7]</sup>。

淤地坝内泥沙淤积特征受区域降雨特性、水动力条件和研究小流域地形地貌特征等多种因素影响,因此坝前沉积物厚度和颗粒组成等在空间上存在很大的变异性,进而影响典型剖面的选择,并进一步影响沉积量的估算和泥沙来源的追踪和反演<sup>[8-9]</sup>。目前许多学者通过小流域淤地坝内的沉积物颗粒分析开展了小流域土壤侵蚀过程、产沙来源等方面的研究,并取得了一些研究成果<sup>[10-13]</sup>。目前研究主要基于<sup>137</sup>Cs 进行时标,然后根据旋回层厚度,建立泥沙沉积过程的时空序列,并结合历次暴雨、洪水资料及流域内的沉积泥沙量来分析流域内的泥沙来源和产沙强度<sup>[14-16]</sup>。Zhang 等<sup>[17]</sup>根据淤地坝沉积泥沙所形成的沉积旋回层厚度,并结合<sup>137</sup>Cs 和孢粉等相关技术分析了小流域在不同时间内的侵蚀产沙速率。然而由于建坝年代限制,并非所有坝地都可用<sup>137</sup>Cs 示踪断代技术,但每一个沉积旋回都对应着一次明显的侵蚀性降雨事件,也相应的会带来一次泥沙的运移和分选过程,因此研究分析坝地的沉积泥沙颗粒的机械组成显得十分必要。弥智娟等<sup>[18]</sup>通过对坝地沉积泥沙的分析,发现坝地沉积泥沙粒级组成中粉粒占主导地位。一些学者通过对坝地内不同分层沉积物的研究分析表明沉积泥沙具有分选性,坝前泥沙颗粒比坝尾的细<sup>[19-20]</sup>。然而有的则认为与此相反,即坝前的颗粒比坝尾的粗,或无明显差异<sup>[21]</sup>。

鉴于此,本文选用延安湫沟的一座 2003 年兴建“闷葫芦坝”为研究对象,分析研究小流域控制坝沉积泥沙垂直剖面泥沙粒径组成变化及分形特征,探讨新的侵蚀背景下小流域侵蚀泥沙再分布特征,以期能够为开展和研究小流域土壤侵蚀及产沙过程提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究小流域位于陕西省延安市湫沟小流域,属于燕沟流域的一条支沟,地理位置为 36°29′96″N, 109°31′11″E,海拔 1 131 m;淤地坝控制面积为 5.23 km<sup>2</sup>。该淤地坝始建于 2003 年,由于淤积时间较短,该淤地坝仍然处于有水状态,且并未出现放水现象。因此,所有小流域侵蚀泥沙全部都被拦蓄在该淤地坝内。该地区的气候特征为半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量为 423 mm,主要集中在 7—9 月份,且多为暴雨。研究区的土壤侵蚀类型主要是水力侵蚀和重力侵蚀。流域内土壤类型以黄绵土为主,主沟道最底层为裸露的基岩。

### 1.2 土壤样品采集和处理

1.2.1 样点布设与土壤样品采集 为了研究淤地坝降雨沉积过程,选择延安市的湫沟小流域的湫沟大坝,由于淤积时间较短,该淤地坝仍然处于有水状态。经过前期调查,于 2012 年选择淤地坝淤积泥沙最厚的点进行淤积泥沙样品的采集,采样使用内径为 42 mm 的食品级不锈钢空心管进行水上采样。在采样的过程中,将空心管垂直打入,直到原始河床(即基岩位置),随后垂直取出,同时根据采样点所处位置的水面深度,当场对钢管进行焊接和截取,以确保采样钢管内土柱样品的完整性,密封带回实验室。在采样的过程中进行 GPS 定位,记录采样点的位置信息。

1.2.2 土壤样品处理 将带回的空心管土柱样品取出上部密封物体后,垂直放置,自然风干,待空心管内样品成半干燥状态后沿着管道中心线垂直剖开(该过程要特别小心,尽量减少对空心管内土柱的影响)。将剖开的土柱样品进行 0.5 cm/样的切割取样。随后将土样处理后装入密封袋内进行保存,用于土壤颗粒组成的分析,并注明采样时间以及采集的土样所处的剖面深度。

### 1.3 土壤样品分析

将土柱分割所得的土壤样品平铺在通风口自然风干、除去草石杂物、研磨、过筛(2 mm 的筛子)。在 100 ml 的烧杯中加入 2~4 g 土壤样品,并加入过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)溶液和 10% 的盐酸(HCL)溶液以消除对土样中的有机质和碳酸盐。最后给每个土壤样品加入六偏磷酸钠(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>溶液,进行分散处理。对处理的土样使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度分析,每个土样重复测量两次,结果取平均值。土壤粒径分类采用 1987 年的中国制标准,分别为黏粒(<0.002 mm)、细粉粒(0.002~0.01 mm)、粗粉粒

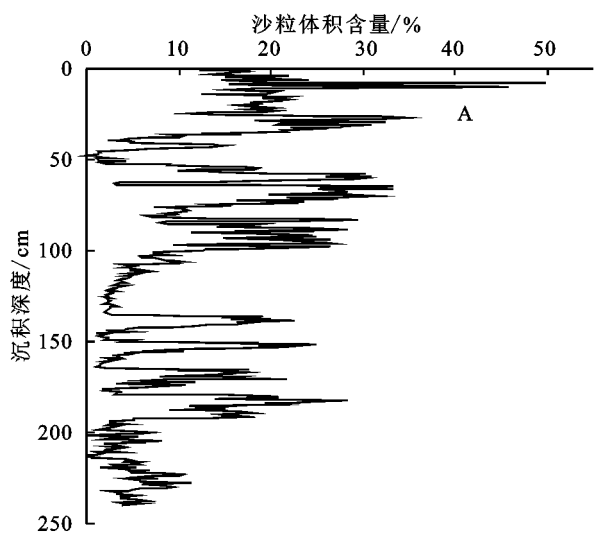
(0.01~0.05 mm)、细沙粒(0.05~0.25 mm)、粗沙粒(0.25~1 mm)。本文采用土壤分形维数和土壤质地粗化度综合描述颗粒分布特征。

土壤分形维数可表征土壤粒径的大小组成,还能反映质地的均一程度,分形维数随着土壤黏粒和粉粒含量的增加,其值越来越大;随着土壤粒径组成中沙粒含量的增大而逐渐减小。计算公式如下:

$$\frac{V(r < R)}{V_t} = (R/\lambda_v)^{3-D}$$

式中: $D$  表示土壤粒径分形维数; $V(r < R)$  表示粒径小于  $R$  的累积体积; $V_t$  表示颗粒总体积; $R$  表示相邻粒级的平均直径; $\lambda_v$  表示最大粒级土粒平均直径。

土壤质地粗化度指的是坝地剖面沉积旋回层中土壤的沙粒含量(>0.05 mm)与黏粒含量和粉粒含量之和(<0.05 mm)的比值。粗化度越大,则粗颗粒泥沙在土壤粒级组成中的成分越多;粗化度越小,则土壤粒级组成中的粗颗粒含量越少,土壤受侵蚀程度越大。



## 1.4 数据处理

本试验原始数据的处理和制图使用 Excel 2010 软件完成,差异显著性检验使用 SPSS 19.0 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 淤地坝沉积泥沙再分布特征

流域坝地侵蚀类型主要以水力侵蚀与重力侵蚀为主,每一场侵蚀性降雨都会形成一次泥沙搬运沉积现象,同时形成一个泥沙沉积旋回层。从图 1A 坝前沉积泥沙剖面中沙粒含量百分比随深度变化的曲线来看,沙粒在坝前沉积泥沙垂直剖面上呈现高值低值交替出现的周期性变化规律,具体表现为:粗细相间分布,由上到下依次呈现细、粗、细、粗的分布规律,并且粗细分布的厚度差异较大。这主要是由于历次侵蚀性降雨的水动力条件分选沉积作用而造成的,大水大沙下,淤积层厚度大,差异也大,水沙较小时,淤积厚度和差异减小。且由于降雨强度不同,流域内的侵蚀产沙量也不尽相同,进而导致剖面各沉积旋回层厚度的有所差异。

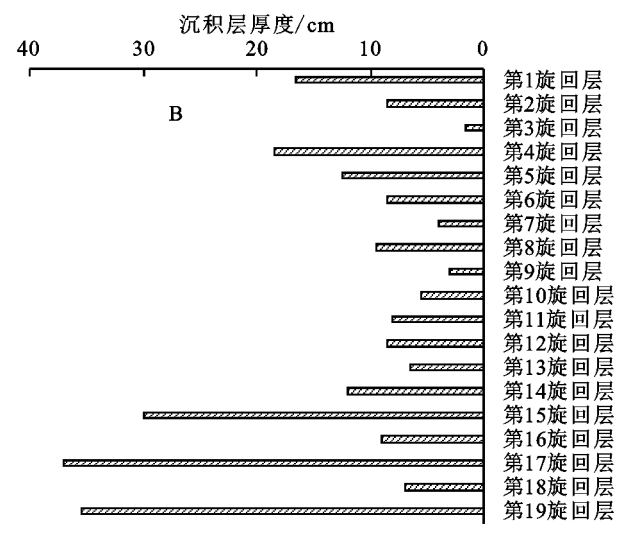


图 1 淤地坝坝前沉积泥沙沙粒含量变化特征(A)及沉积旋回厚度变化特征(B)

结合研究小流域降雨特性,根据坝前泥沙粗颗粒(沙粒)的周期变化特征<sup>[22]</sup>,从沙粒百分含量最小开始到沙粒百分含量逐渐增大到一定程度便开始突然减少为止即为一个完整的沉积旋回。因此,在本研究小流域淤地坝淤积期间,坝内沉积泥沙共存在 19 个沉积旋回层(图 1B)。旋回层的沉积厚度表示单次洪水事件过后,沉积在淤地坝前的泥沙总厚度。在该研究中,不同旋回层的沉积厚度差异显著,平均厚度为 12.7 cm,其中,第 3 旋回层厚度最小(1.5 cm),第 17 旋回层厚度最大值(37 cm)。不同旋回层的沉积厚度标准差为 10.48,变异系数为 0.82,属于中等强度变异。从沉积厚度变化趋势分析发现,泥沙沉积较厚的层次均分布在建坝初期,随着沉积时间,除去第 1、第

4 和第 5 旋回层,其他旋回层厚度均低于 10 cm,即坝前沉积泥沙层厚度随着沉积时间显著降低。

### 2.2 小流域侵蚀沉积泥沙粒径特征分析

2.2.1 不同旋回土壤粒径的变化特征 由表 1 可知,坝地剖面沉积旋回层中各粒径组成以粗粉粒含量最多,所占比例达到 51.73%;其次为黏粒,所占比例为 19.88%;粗沙粒含量最少,所占比例仅仅为 0.25%。研究小流域坝地剖面各粒径含量由大到小分别是粗粉粒(51.73%)、黏粒(19.88%)、细粉粒(17.30%)、细沙粒(10.85%)、粗沙粒(0.25%);各粒径变异系数由大到小依次为粗沙粒>细沙粒>细粉粒>黏粒>粗粉粒,其中粗砂粒变异系数可达 387.04%,而黏粒、细粉粒和粗粉粒仅仅分别为 28.93%,36.16%和 13.36%,说明

粉粒与黏粒在研究小流域的输移、沉积过程中分选性较差。

表 1 研究区坝地剖面沉积旋回层各粒径的统计分析

粒 径	平均值%	方差	标准差	变异系数%
黏 粒	19.88	33.06	5.75	28.93
细粉粒	17.30	39.19	6.26	36.16
粗粉粒	51.73	47.75	6.91	13.36
细沙粒	10.85	52.71	7.26	66.95
粗沙粒	0.25	0.90	0.95	387.04

进一步从研究区坝地剖面不同沉积旋回层各粒径的统计分析(图 2)可以看出,整个剖面共形成 19 个沉积旋回层,且每个旋回层中各级沉积泥沙在坝内的空间分布变化较大,变化差异显著( $p<0.05$ )。各沉积层粒径组成均以粗粉粒为主,所占比例在 42.85%~62.60%;不同旋回层中,粗沙粒仅在 3 个旋回层中出现(第 1,9,12 旋回层);细沙粒(3.86%~27.02%)、细粉粒(8.20%~24.22%)和黏粒(12.05%~27.01%)的体积分数接近。而旋回层中粉粒与沙粒极值的空间分布则大致相反,即粉粒含量出现最大值时沙粒含量通常出现最小值,反之亦然。分析表明,退耕还林具有降低土壤细颗粒物流失的作用,且年际变化显著。

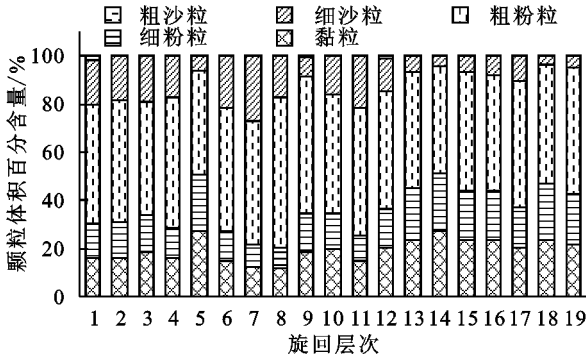


图 2 不同沉积旋回层粒径的组成特征

2.2.2 不同旋回土壤粒径分形维数的变化特征 由表 2 可以看出,该流域坝地剖面各沉积旋回层的土壤分形维数在 2.60~2.78,平均值为 2.70。其中第 8 旋回层分形维数最低(2.60);第 14 旋回层最高(2.78);分形维数的线性回归的决定系数在 0.91~0.96,相关性极好,说明所有的分形参数在计算上是可信的。但是不同旋回层次的分形维数随着沉积深度有逐渐增大的趋势,即随着沉积时间不同旋回层次沉积泥沙颗粒的分形维数呈现增大趋势,表明随着退耕时间的增加,小流域侵蚀泥沙的细颗粒物含量增加。但整个剖面上泥沙粒径的分形维数随沉积深度并无显著性差异,这表明该流域土壤质量良好。

为研究分形维数与土壤各粒级含量之间的关系,

本文采用皮尔逊相关分析进行分析(表 3),分析结果表明,黏粒与分形维数的相关系数最大为 0.99;粗砂粒的相关系数最小为-0.12。分形维数与黏粒、细粉粒、粗粉粒和细砂粒含量在 99%检验水平上均呈现出极显著相关关系,而与粗砂粒不存在显著的相关关系;且黏粒和细粉粒与分形维数呈正相关关系,而粗粉粒和细砂粒与分形维数呈负相关关系。因此,具有较高的黏粒和细粉粒含量(即细物质颗粒含量),较低的砂粒含量的旋回层具有较高的分形维数值。

表 2 小流域坝地剖面泥沙粒径的分形维数的统计分析

旋回层	分形维数	$r$	旋回层	分形维数	$r$
第 1 旋回层	2.67	0.95	第 11 旋回层	2.64	0.95
第 2 旋回层	2.67	0.95	第 12 旋回层	2.72	0.94
第 3 旋回层	2.70	0.95	第 13 旋回层	2.76	0.92
第 4 旋回层	2.67	0.94	第 14 旋回层	2.78	0.91
第 5 旋回层	2.78	0.92	第 15 旋回层	2.75	0.92
第 6 旋回层	2.65	0.95	第 16 旋回层	2.75	0.93
第 7 旋回层	2.61	0.96	第 17 旋回层	2.72	0.93
第 8 旋回层	2.60	0.94	第 18 旋回层	2.76	0.91
第 9 旋回层	2.71	0.93	第 19 旋回层	2.74	0.92
第 10 旋回层	2.71	0.95	—	—	—

表 3 小流域坝地剖面泥沙粒径的分形维数与各级粒径相关分析

参数	分形维数	黏粒	细粉粒	粗粉粒	细砂粒	粗砂粒
分形维数	1	—	—	—	—	—
黏粒	0.99 **	1	—	—	—	—
细粉粒	0.98 **	0.97 **	1	—	—	—
粗粉粒	-0.68 **	-0.70 **	-0.66 **	1	—	—
细砂粒	-0.90 **	-0.88 **	-0.91 **	0.31	1	—
粗砂粒	-0.12	-0.15	-0.13	-0.08	0.15	1

注: \*\* 在 0.01 水平相关性显著。

2.2.3 坝地土壤颗粒剖面粗化度的变化 坝地土壤颗粒组成主要以粗粉粒和细沙粒为主,说明径流对小流域侵蚀泥沙颗粒具有一定的分选性。由于土壤侵蚀会引起粒径的分选,因此采用粗化度可以用来说明沉积泥沙颗粒组成的变化。土壤质地粗化度指的是坝地剖面沉积旋回层中土壤的沙粒含量( $>0.05$  mm)与黏粒含量和粉粒含量之和( $<0.05$  mm)的比值。粗化度越大,则粗颗粒泥沙在土壤粒级组成中的成分越多;粗化度越小,则土壤粒级组成中的粗颗粒含量越少,土壤受侵蚀程度越大。

研究结果表明(图 3),该研究区小流域坝地沉积泥沙质地粗化度分布范围在 0.04~0.37,平均值为 0.16。且该坝地接近地表的剖面的质地粗化度均较大,而靠近最底下基岩位置处的质地粗化度都较小,

即其泥沙颗粒粒径组成呈现先细后变粗随后又再次细化的趋势。

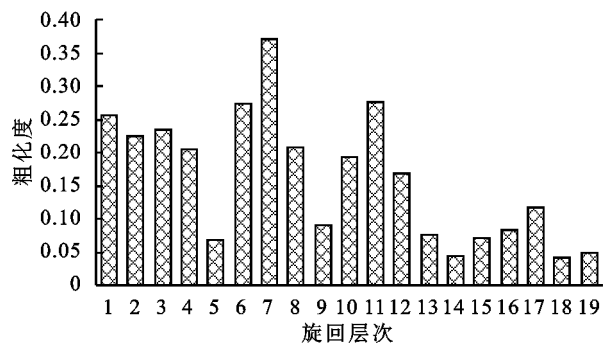


图3 坝地沉积泥沙质地粗化度的剖面变化

### 3 讨论

在黄土丘陵区,每场降雨或洪水都会将坝控小流域沟坡、沟谷及沟间地的土壤冲刷后,经过搬运、沉积,最后淤积在坝地。经过长期的研究与分析,进入流域出口的泥沙在淤积的过程中有一个不变的定律:即粗颗粒泥沙较黏粒和粉粒先行沉积,淤积在旋回层最下层,其次是粉粒和黏粒,同时,在淤地坝垂直剖面形成一个个具有时标功能的沉积旋回层<sup>[4]</sup>。而降雨量和降雨强度都会引起径流量和水流流向的变化<sup>[23]</sup>。当流域内的水动力较强时,其冲刷和搬运能力也强,则更多的泥沙颗粒通过径流被输移至淤地坝进而发生沉积,沉积的泥沙粒径较粗,淤积层厚度大;水动力条件较弱时,则小流域坝地沉积的泥沙颗粒粒径较细,淤积层厚度相对较小,因此,每个沉积旋回层有明显的粗细分层结构。且由于降雨强度不同,流域内的侵蚀产沙量也不尽相同,进而导致剖面各沉积旋回层厚度的有所差异且各沉积旋回层厚度的差异显著。但随着小流域水土流失治理林草措施(退耕还林草)的实施,小流域内土地利用和植被覆盖逐年发生变化,研究表明退耕还林还草工程实施对土壤侵蚀具有明显的减缓作用<sup>[24]</sup>,且在相同的植被盖度等级下,耕地—林地转化区和耕地—草地转化区的土壤侵蚀模数呈减少趋势<sup>[25]</sup>。本研究结果发现坝前沉积泥沙层厚度随着沉积时间显著降低,一方面是由于随着植被的恢复,其对泥沙的拦截作用增强,导致进入沟道的泥沙量减少。另一方面是随着泥沙的不断淤积,原始沟道被泥沙所掩埋,在一定程度上减缓了沟道侵蚀。

淤积在坝前的泥沙经过了分选,相应的泥沙颗粒的组成也发生了变化,因此小流域坝地沉积物中泥沙颗粒粒径组成对土壤侵蚀过程的演变具有一定的指示作用,本文的研究结果表明,该地区小流域淤地坝

垂直剖面层中沉积泥沙不同粒径的变异程度互不相同,变异性由大到小分别为粗沙粒(387.04%)>细沙粒(66.95%)>细粉粒(36.16%)>黏粒(28.93%)>粗粉粒(13.36%)。分析认为,沙粒和黏粒的变异性大小可能与其含量的大小有重要的关系。大于0.05 mm的粗颗粒泥沙的变异性与降雨、洪水特性、泥沙的来源,以及坝地所处的流域空间位置等因素密切相关,而由于黏粒的含量最大,因而变异性最小。当某次降雨强度较大时,径流对表层土壤的冲刷能力增强,从沟边与沟底进入流域内的泥沙颗粒特别是粗颗粒泥沙含量便会增多。造成坝地该次沉积泥沙粒径组成中粗颗粒泥沙含量显著增多,这一点与李勉等<sup>[8]</sup>的研究结果相符。

从粗粉粒含量随剖面变化的曲线可以看出,深度越大,粗颗粒泥沙粒径的变异程度越大,究其原因这是由于淤地坝在建成之时,由于流域内河道比降较大,水动力条件较为复杂,进而导致沉积物泥沙颗粒粒径的变异程度较大。随着时间的推移,由于该淤地坝淤积的泥沙量和淤积面积的逐渐增大,致使流域内的水动力条件逐渐变得平稳,泥沙粒径的变异程度呈显著减小。且该流域坝地剖面各沉积旋回层的土壤分形维数在2.60~2.78,整个剖面上泥沙粒径的分形维数随有逐渐增大的趋势,即随着沉积时间不同旋回层次沉积泥沙颗粒的分形维数呈现增大趋势,表明随着退耕时间的增加,小流域侵蚀泥沙的细颗粒物含量和分形维数均增大,这与董莉丽等<sup>[26]</sup>的研究结论一致。

进一步分析其质地粗化度,结果发现随着剖面深度增大,其值变小,泥沙粒径组成逐步细化,可能与周边人为营造的树木有关,因为植被不仅可以有效的防止水土流失,还可以拦截地表径流,减小径流流速,削减洪峰,致使冲刷过程中产生的泥沙减少,植被根系过滤了较粗的颗粒,致使进入流域内的粗颗粒泥沙量减少。

### 4 结论

(1) 小流域坝地沉积泥沙剖面粒径呈现高值低值交替出现的周期性变化规律:即粗细相间分布,由上到下依次呈现细、粗、细、粗的分布规律,且粗细分布的厚度差异较大,总体上沉积泥沙层厚度随着沉积时间显著降低。

(2) 淤地坝沉积泥沙粒径主要以粗粉粒(0.01~0.05 mm)为主,平均百分含量为51.73%,且坝地剖面各分层的分形维数分布范围在2.60~2.78,其中黏粒和细粉粒与分形维数呈极显著正相关关系,而粗粉粒和细

砂粒与分形维数呈极显著负相关关系。随着退耕时间的增加,小流域侵蚀泥沙中的细颗粒物含量增加。

(3) 小流域坝地沉积泥沙质地粗化度在 0.04~0.37,平均值为 0.16。在接近地表的剖面的质地粗化度都较大,而靠近最底下基岩位置处的质地粗化度都较小。

#### 参考文献:

- [1] 何族.基于分布式土壤侵蚀模型的水土保持分析评价系统设计与实现[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [2] 王万忠,焦菊英,魏艳红.黄河主要产沙区雨沙关系及泥沙变化特征[J].泥沙研究,2019,44(2):41-47.
- [3] 张凯,陈丽茹,徐慧敏,等.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域植物群落特征的空间变异及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(8):2521-2530.
- [4] 张玮,杨明义,张风宝,等.黄丘区小流域坝地沉积泥沙粒径剖面分布特征[J].水土保持研究,2015,22(2):17-21.
- [5] Tang Q, Xu Y, Bennett S J, et al. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(4):1715-1724.
- [6] 张风宝,杨明义,张加琼,等.黄土高原淤地坝沉积泥沙在小流域土壤侵蚀研究中的应用[J].水土保持通报,2018,38(6):365-371.
- [7] 岳大鹏,李奎,刘鹏,等.基于 RUSLE 的黄土洼小流域土壤侵蚀与水土保持研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2015,43(2):85-91.
- [8] 李勉,杨二,李平,等.黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J].农业工程学报,2017,33(3):161-167.
- [9] Wang Y, Chen L, Fu B, et al. Check dam sediments: an important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014, 186(7):4275-4287.
- [10] Abedini M, Said M A M, Ahmad F. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment(The Ulu Kinta Basin)[J]. Catena, 2012,97(1):63-70.
- [11] Tang Q, Shuai W, Bojie F, et al. Check dam infilling archives elucidate historical sedimentary dynamics in a semiarid landscape of the Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2018,118:161-170.
- [12] Pal D, Galelli S, Tang H, et al. Toward improved design of check dam systems: A case study in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2018,559:762-773.
- [13] 陈方鑫,张含玉,方怒放,等.利用两种指纹因子判别小流域泥沙来源[J].水科学进展,2016,27(6):867-875.
- [14] 王文娣.黄土高原小流域泥沙来源与粒径变化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [15] 李勉,杨二,李平,等.淤地坝赋存信息在流域侵蚀产沙研究中的应用[J].水土保持研究,2017,24(3):357-362.
- [16] 刘鹏.陕北黄土洼古聚淤沉积物特征分析研究[D].西安:陕西师范大学,2014.
- [17] 张信宝, Walling D E, 贺秀斌,等.黄土高原小流域植被变化和侵蚀产沙的孢粉示踪研究初探[J].第四纪研究,2005,25(6):722-728.
- [18] 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.
- [19] 毕慈芬,左仲国,冉大川,等.黄河中游淤地坝淤积泥沙级配组成分析[J].人民黄河,2011,33(1):92-94.
- [20] Zou Y, Chen X. Granular sediment deposition and aggregation upstream of a check dam: A discrete element study[J]. Powder Technology, 2016,307(2017):90-98.
- [21] 刘秀珍,李翔,向云,等.树儿梁小流域坝地土壤颗粒的分形特征[J].核农学报,2011,25(2):337-341.
- [22] 刘鹏,岳大鹏,李奎.陕北黄土洼淤地坝粗颗粒沉积与暴雨关系探究[J].水土保持学报,2014,28(1):79-83.
- [23] 刘钦.纸坊沟流域暴雨侵蚀与坡面人工降雨产流产沙试验研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [24] Yang B, Wang Q J, Xu X T. Evaluation of soil loss change after Grain for Green Project in the Loss Plateau: a case study of Yulin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(8):304, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7394-6>.
- [25] 冯精金,明昌,姜群鸥.潮白河流域土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):121-132.
- [26] 董莉丽,马孝燕,胡丹,等.吴起县退耕还林样地土壤粒径分布的单一和多重分形特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):111-115.