

黄丘区小流域坝地沉积泥沙粒径剖面分布特征

张 玮¹, 杨明义^{1,2}, 张凤宝^{1,2}, 张加琼^{1,2}, 赵恬茵¹

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

摘 要:坝地沉积泥沙记录了坝控小流域内土壤侵蚀特征及侵蚀环境演变的相关信息,是研究流域土壤侵蚀的重要媒介。研究通过在淤地坝内洪水冲开的一个 11.66 m 的垂直剖面上按沉积旋回自下而上分层取样,分析沉积泥沙不同组分百分含量、特征粒径的剖面变化规律。结果表明:1) 淤地坝内沉积泥沙主要以粗粉粒(0.01~0.05 mm)为主,其平均含量为 53.61%,且变异系数最小;2) 个别层次出现粗砂(0.25~1 mm),粗颗粒泥沙的出现对流域内大暴雨有一定的指示作用;3) 沉积剖面的 0~67 cm 为累积耕作层,该层的出现具有一定的时标意义;4) 淤地坝沉积剖面存在粒径变异的转折点(600 cm),该点可用来衡量水沙动力条件和沟道比降对泥沙粒径分布所起的作用。

关键词:土壤侵蚀;沉积旋回;粒径;黄土高原;淤地坝

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)02-0017-05

Profile Distribution of Particle Size of Sediment at a Check Dam in a Small Watershed of the Loess Plateau

ZHANG Wei¹, YANG Mingyi^{1,2}, ZHANG Fengbao^{1,2}, ZHANG Jiaqiong^{1,2}, ZHAO Tianyin¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The sediment is an important medium for retrieval of the soil erosion characteristics, which indicates the important information about the environmental processes in relation to soil erosion and deposition. We analyzed the variation of the different components, percentages and the characteristics of particle sizes, which were sampled from a 11.66 m depth soil profile in the typical check dam on the Loess Plateau. The result showed that: 1) the deposition sediment mainly contains coarse silt(0.25~1 mm) with the average content of 53.61%, and the coefficient of variation was minimum; 2) sand(0.25~1 mm) was found only in a few layers, indicating the heavy rain in watershed; 3) there was an accumulated cultivated layer at the depth of 0—67 cm in the profile, which had indicative role for special time; 4) there was a turning point(600 cm) in the profile, which can be used to measure the effect of the water and sediment conditions and channel gradient, and had an indicative role for the sediment erosion environment of check dam.

Keywords: soil erosion; cycle of sedimentation; particle size; check dam; Loess Plateau;

黄土高原沟壑众多,是我国乃至世界水土流失最严重的地区,对该区域水土流失的治理不仅关乎区域生态安全,而且对黄河健康运行及黄河下游生态安全都具有非常重要的意义。淤地坝是黄土高原地区最为重要的水土保持工程措施,它既能有效防治水土流失,又能形成坝地,充分利用水土资源,具有十分重要的作用^[1-3]。同时,淤地坝又相当于小流域的沉砂池,拦蓄了大量的泥沙,沉积泥沙记录了坝控流域内的土壤侵蚀特征及侵蚀环境演变的相关信息,成为研究流域土

壤侵蚀的重要媒介^[4]。目前,利用淤地坝沉积泥沙反演流域侵蚀产沙过程的研究,多数是基于¹³⁷Cs的时标功能,建立沉积剖面的年代框架,在此基础上结合流域降雨资料和沉积泥沙量分析泥沙来源^[5-6]及产沙强度^[7-9]。但由于¹³⁷Cs主要来源于20世纪50—70年代大气核试验,对流域建坝时间有一定要求。有研究^[10]指出淤地坝沉积剖面的养分含量(全氮和有机质)呈阶段性变化,其反映的阶段性时间框架与同一剖面¹³⁷Cs建立的时间序列相吻合。但整体而言,运用沉积剖面中泥沙理化性质的垂直分布规律,重建流域侵蚀环境

收稿日期:2014-09-30

修回日期:2014-11-16

资助项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201201084);水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放基金(201202);中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04-03);西北农林科技大学基本科研业务费专项经费项目(QN2011146)

第一作者:张玮(1989—),女,山西省长治人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀方面的研究。E-mail:835153093@qq.com

通信作者:杨明义(1970—),男,山东莱州人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀核示踪技术研究。E-mail:ymzyly@163.com

的演变过程是沉积泥沙研究的一项薄弱环节。

粒度分析是对沉积泥沙粒径范围、含量及分布的分析。不同粒径特征反映不同的搬运介质、搬运方式及沉积环境。通过对沉积物粒径特征的分析可以获得沉积环境和沉积物源信息^[11-12]。因此,本文利用淤地坝沉积泥沙的粒径组成、流域降雨资料,研究黄土高原典型小流域淤地坝沉积泥沙的粒径特性及其剖面分布规律,分析粒径特征对流域侵蚀环境和人类活动的指示作用,为反演小流域土壤侵蚀及产沙过程提供理论依据^[13]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次研究主要以陕北延长县胡家湾流域为研究区,距延安市区约 37.6 km。全县绝大部分地域属黄河流域的延河水系,延河境内流长 144 km,集水面积 1 724 km²,占总面积的 73%,河床平均比降 2.8‰。多年平均径流总量 2.23 亿 m³,多年平均输沙量为 6 584 万 t。全县多年平均降水量 565.7 mm,总量 12.726 亿 m³,降水量年际变化很大。研究区小流域地理坐标介于东经 109.75°—109.80°,北纬 36.47°—36.50°,属于延河二级支流,是典型的黄土丘陵沟壑区。该区属半干旱大陆性季风气候,每年降水多集中在 6—9 月。

1.2 研究材料

本文以 1971 年修建的胡家湾淤地坝为研究对象,该坝主要拦截了 1973 年至淤满时期(2003 年)集水区内的泥沙。淤地坝内 1999 年开始耕种,通过对当地农户的调查,该坝地种植的农作物主要为玉米。2013 年 7 月 12 日,延安地区出现高强度长历时的特大暴雨,胡家湾大坝被冲毁。2013 年 8 月 25 日,在距离坝体 15 m 的冲开剖面上进行采样,按沉积旋回分层取样,每个旋回底部的泥沙粗,顶部泥沙细,野外易于区分。沉积旋回厚度差异很大,数厘米至数 10 cm 不等,根据其厚度,沿着垂直剖面自下而上依次取样。部分旋回泥层、沙层各采一个样品。最终 38 个沉积旋回共采集了 55 个泥沙样品(包括地表耕层)。

1.3 研究方法

泥沙样带回实验室平铺在白纸上自然风干后,过 1 mm 的筛子,剔除杂物。取土样 5~10 g 放入 250 ml 烧杯中,加过氧化氢溶液,沙浴加热使其充分反应,去除样品中的有机质;冷却后加 10% 的盐酸溶液,去除样品中的碳酸盐;加入蒸馏水,静置 24 h,倒掉上清液,反复数次,直至溶液呈中性;最后在上机前加入六偏磷酸钠溶液。处理好的样品用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行土壤粒径分析,每个土样重复测量两次,结果取其平均值。土壤粒径分形维数采用

下式计算^[14-15]:

$$\frac{V(r \geq R)}{V_T} = 1 - \left(\frac{R}{\lambda_v} \right)^{3-D}$$

式中: D ——土壤粒径分形维数; $V(r < R_i)$ ——直径小于 R_i 的累积体积; V_T ——总体积; R_i ——相邻粒级平均直径; λ_v ——最大粒级土粒平均直径;其中粒级 $< 2 \mu\text{m}$ 时 R_i 取值为 $1 \mu\text{m}$ 。

本文采用 Excel 2003 进行数据整理,运用 SPSS 16.0 对数据进行统计分析,图形绘制采用 Origin 8.0。

2 结果与分析

2.1 淤地坝沉积泥沙粒径特征分析

在黄土高原地区,并非所有的降雨都能产生土壤侵蚀,只有部分降雨产生地表径流,引起土壤侵蚀,发生真正意义上的水土流失^[16]。侵蚀性降雨将坝控流域内坡面、沟谷及沟间地的表层土壤冲刷后,这些土壤随径流运移至坝前沉积,单次洪水经过淤积后形成一个沉积旋回。沉积物在垂直方向上由于其成分、颜色和结构的不同而形成明显的层次,最明显的层次标志就是剖面土壤粒径的变化:沉积泥沙在整个剖面内“粗—细—粗—细”交替变化,沉积旋回规律明显。这是由于泥沙在沉降过程中,粒径较大的泥沙颗粒先沉积,粒径较小的泥沙颗粒后沉积。因此,在划分淤积层时,根据淤泥在上、沙在下的原则,把相邻的泥层和沙层划为一沉积旋回。淤地坝淤满之后,坝内沉积泥沙的垂直剖面记录了从建坝到淤满期间洪水形成的沉积泥沙层次。现将沉积物粒径采用 1987 年中国制标准^[17],划分为五个范围。

由沉积剖面土壤各组分含量的统计描述可以看出,在沉积物粒径组成上,研究区淤地坝沉积泥沙粒径以粗粉粒(0.01~0.05 mm)为主,然后依次为细粉粒(0.002~0.01)、细砂粒(0.05~0.25 mm)、黏粒($< 0.002 \text{ mm}$)、粗砂粒(0.25~0.1 mm);其变异程度依次为:粗粉粒 $<$ 黏粒 $<$ 细粉粒 $<$ 细砂粒 $<$ 粗砂粒。其中粗粉粒含量最高,其百分含量的变动范围为 41.06%~65.77%,均值为 53.61%,且在整个剖面内分布较均衡,变异系数最小;粗砂仅在个别深度处出现,55 个泥沙样品中只有 18 含有粗砂,且含量高于 1% 的仅有 5 个,变异系数最大。由此可见,通常的侵蚀性降雨都能将 0.01~0.05 mm 范围内的土壤颗粒从坡上冲刷下来,进而搬运至下游在淤地坝前沉积下来。由表 1 可知,流域内四个潜在泥沙源地(农地、草地、林地和沟壁)的土样中,粗粉粒的百分含量较其他组分的均较高,分别为 56.53%,57.03%,57.51%和 57.26%,变异系数也最小;黏粒($< 0.002 \text{ mm}$)和粗砂粒(0.25~0.1 mm)的百分含量均较小,变异系数较大。因此,坝地沉积泥沙中粗粉粒含量较多,黏粒和粗

砂百分含量较小是流域内表层土壤本身的组分特征导致的,不足以说明粗砂和黏粒在搬运或沉积过程中具有较差的分选性。对于沉积旋回中含量最多的粗粉粒(0.01~0.05 mm),四个地类均没有显著性差异($p>0.05$),林地和草地土壤的不同组分均没有显著性差异

($p>0.05$),农地和沟壁之间细粉粒(0.002~0.01 mm)和细砂粒(0.05~0.25 mm)含量存在显著性差异($p<0.05$),其他三种组分含量均没有显著性差异($p>0.05$)。此外,由于采样点位于坝前 15 m,粗颗粒的出现对于流域内的暴雨有一定的指示作用^[18-19]。

表 1 流域表层土壤和沉积旋回泥沙组分含量统计特征

位置	项目	物理性黏粒/%		物理性砂粒/%		
		黏粒 ($<0.002\text{ mm}$)	细粉粒 ($0.002\sim0.01\text{ mm}$)	粗粉粒 ($0.01\sim0.05\text{ mm}$)	细砂粒 ($0.05\sim0.25\text{ mm}$)	粗砂粒 ($0.25\sim1\text{ mm}$)
沉积旋回	均值	12.50	17.91	53.61	15.58	0.24
	最大值	22.28	32.81	65.77	42.24	2.72
	最小值	5.45	7.23	41.06	2.16	0.00
	标准差	4.85	7.89	5.66	10.79	0.55
	变异系数	38.8	44.06	10.56	69.25	230.15
农地	均值	11.28a	14.15a	56.53a	17.98a	0.06a
	最大值	13.02	16.84	59.15	23.17	0.27
	最小值	8.29	10.31	52.48	14.66	0.00
	标准差	1.20	1.67	1.75	2.37	0.09
	变异系数	10.68	11.83	3.09	13.19	146.23
草地	均值	9.87b	13.06b	57.03a	19.52ab	0.52b
	最大值	12.11	17.57	59.90	25.68	2.07
	最小值	7.48	9.98	54.76	15.11	0.00
	标准差	1.21	1.75	1.47	3.03	0.52
	变异系数	12.28	13.36	2.57	15.54	99.89
林地	均值	10.05b	13.07b	56.51a	20.01b	0.36b
	最大值	14.41	18.19	59.90	24.97	0.87
	最小值	8.35	11.02	51.40	15.25	0.00
	标准差	1.49	1.69	2.18	2.65	0.24
	变异系数	14.84	12.95	3.87	13.24	67.90
沟壁	均值	12.12a	16.23c	57.26a	14.13c	0.27a
	最大值	16.91	22.75	64.04	31.46	3.58
	最小值	6.95	8.73	48.85	4.56	0.00
	标准差	2.77	3.50	4.44	6.12	0.83
	变异系数	22.88	21.54	7.75	43.28	306.02

注:利用 Mann-Whitney U 非参数检验法进行显著性检验,相同字母代表差异性不显著($p>0.05$)。

2.2 淤地坝沉积泥沙不同组分的剖面分布

坝地沉积旋回剖面的粒径组成主要是受泥沙来源及机械沉积作用的双重影响。在该研究区,水动力条件是影响机械沉积作用的主要因素之一。水流的流速、方向及稳定状况都会对沉积物的沉积产生影响。水动力条件较强时,剥蚀和搬运能力强,更多的颗粒物可被携带至采样点,沉积物粒径较粗。水动力条件较弱时,沉积物粒径较细。从各粒径组分百分含量在剖面的变化来看,各粒径组分在剖面呈现高低值交替变化的规律。除粗粉粒在剖面分布较均衡外,黏粒、细粉砂和细砂在剖面各深度处均呈锯齿状变化。

由图 1 可以看出,黏粒和细粉粒随着剖面深度的增加,有着相似的变化规律。由粗粉粒曲线可以看出随着剖面深度的增加,泥沙粒径变异程度增大,其原因可能是在淤地坝拦沙初期,河道比降较大,水

沙动力条件复杂,导致沉积泥沙粒径的变异程度较大;随着坝地淤积泥沙量和淤积面积的增大,坝尾到坝体的比降也随之减小,水流动力条件变得平稳,致使泥沙粒径变异程度减小。此外图示 5 个曲线中,600 cm 和 900 cm 是两个转折点;600—900 cm 之间,黏粒和细粉粒的百分含量与上下两段相比较少,且沉积旋回层整体较厚;而相应的位置细砂粒和粗砂粒的含量正相反,含量较多。0~600 cm 之间的淤积层次明显较薄,沉积旋回厚度的变化可能存在以下几方面的原因,一是流域内大面积的退耕还林草导致流域内侵蚀量逐渐减小;二可能是随着坝地淤积泥沙量和淤积面积的增大,使相同侵蚀量的泥淤积厚度变薄;三可能是泥沙淤积对原始沟道的掩埋,抬高基准面,在一定程度上控制了沟道侵蚀;具体原因有待进一步验证。

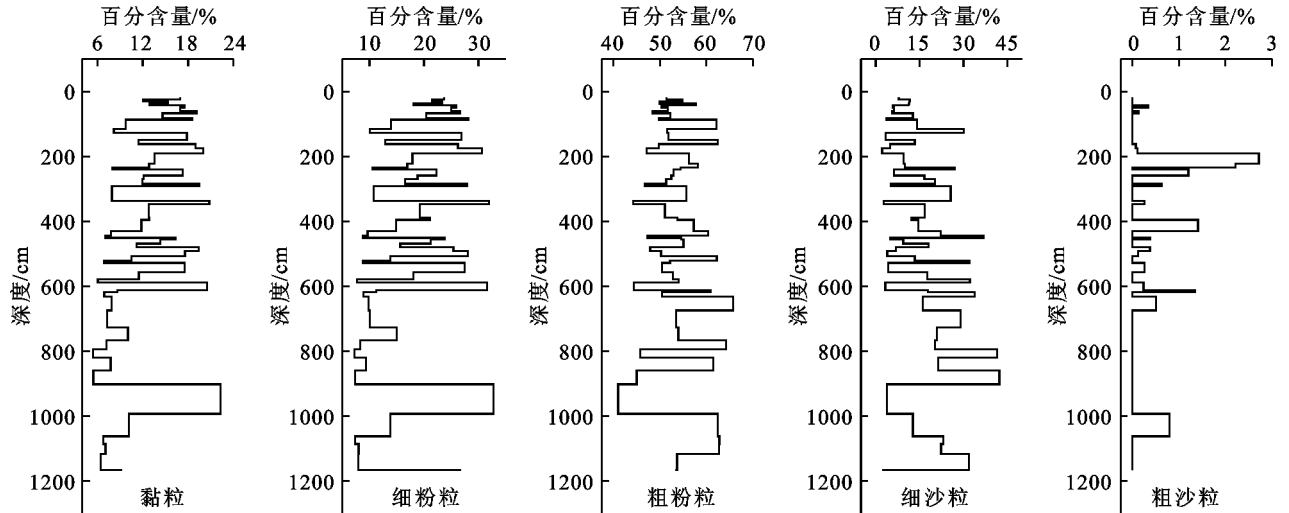


图 1 研究区淤地坝沉积泥沙各组分百分含量的剖面变化

此外,沉积剖面 0—67 cm 范围内,土壤各粒径的百分含量变异系数均较小,并且都接近均值,质地较均一。根据对当地农户的调查,该坝地 1999 年开始种植玉米,每年都会翻耕。1999 年之后还有淤积,坝地在 2003 年淤满。因此,当降雨发生后,尽管上游来水来沙被淤地坝拦截,但在长期翻耕条件下,不同粒径的土壤被均匀混合,耕作层不断抬升,最终形成了厚达 69 cm 的累积耕作层,这一层次的出现与汪亚峰等^[20]在延安羊圈沟流域的研究结果相一致。因此,67 cm 处的沉积旋回即为 1999 年淤地坝最初耕作的时间。累积耕作层的出现,确定了流域人为干扰的层

次,具有一定的时标特征。

2.3 淤地坝沉积旋回土壤特征粒径和分形维数的剖面分布

用来描述平均粒度和粒度分布范围的参数叫做特征粒径。特征粒径通常是用来刻画粒度分布的重要指标。

本研究选取的土壤特征粒径为有效粒径 $[d(0.1)]$ 、中值粒径 $[d(0.5)]$ 、众数粒径 $[d(0.9)]$ 和体积加权平均粒径 $[D[4.3]]$ 。此外,根据 Tyler 等分析维数计算公式,计算得到 55 个土壤样品的分形维数 D ,并作出剖面分布图。

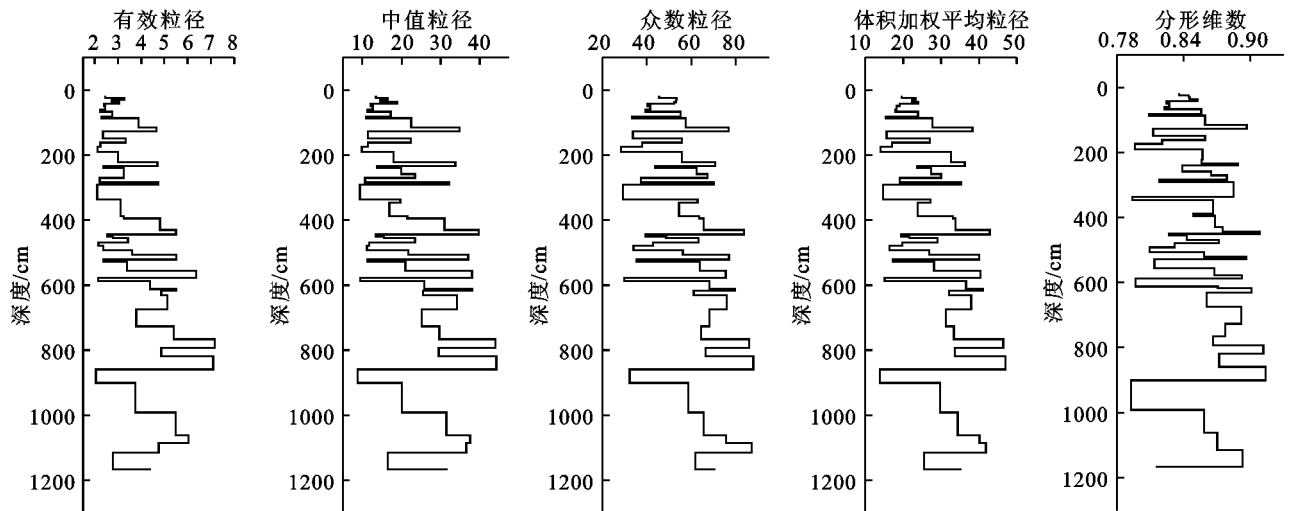


图 2 研究区淤地坝泥沙特征粒径和分形维数的剖面分布

从图 2 可以看出,四个特征粒径指标值的剖面分布趋势基本一致。各曲线在 0—67 cm 剖面内的变异程度均较小,再次印证其作为累积耕作层标记侵蚀年代 1999 年的可靠性。沉积剖面体积平均粒径 $[D[4.3]]$ 的最大值 (0.047 mm) 出现在第 32 个沉积旋回 (地表耕层以下为第一个沉积旋回,随着深度的增加直至第 37 个沉积旋回),在这一层,砂粒 (0.05~

1 mm) 的含量也出现最大值。因此该沉积层可以作为标记某次强降雨和强侵蚀事件的参考。此外,由土壤分形维数的剖面分布可以看出其值在 0.14~1.27 之间变化,变化趋势与平均粒径非常相似。

泥沙颗粒大小常使用中值粒径 $d(0.5)$ 来表示,剖面沉积旋回的划分是根据泥沙颗粒大小来划分的,旋回层中各采样层的泥沙颗粒大小均有差异。由图

2可知,各个旋回层的中值粒径 $d(0.5)$ 是随着剖面深度的增加,有增大的趋势。即说明该流域侵蚀所产生的泥沙颗粒随着时间的推移,有细化的趋势。结合泥沙不同组分百分含量的变化,说明600 cm可以作为一个转折点,这一深度以下,沉积泥沙粒径较大、沉积旋回厚度较大;相对应的这一点以上,泥沙粒径较小,沉积厚度也较小。可以初步推断为建坝初期,淤地坝拦截的粗泥沙较多,随着流域侵蚀环境的演变和淤地坝淤地面积增大,从坝尾到坝体比降的变小,更多的粗沙可能淤积到坝尾,而本次采样点处于靠近坝体位置,使得细颗粒所占比例逐渐增大。因次,沉积物中粗颗粒泥沙的含量能够在一定程度上指示水动力的强弱及淤积特征的变化。

3 结论

1) 淤地坝沉积泥沙主要以粗粉粒(0.01~0.05 mm)为主,平均百分含量为53.61%,且变异系数最小。粗砂(0.25~1 mm)仅出现在个别层,百分含量大于1%的仅有5层,粗颗粒泥沙的出现对流域内大暴雨有一定的指示作用。但砂粒含量不仅与降雨量有关,还与暴雨初始强度、连日暴雨等特性有关,所以砂粒含量的峰值不一定对应降雨量的峰值。

2) 根据泥沙不同粒径百分含量的剖面分布、特征粒径的剖面分布等可以识别沉积旋回中的累积耕作层。这一层次在沉积剖面内形成一个较可靠的时间标识,有助于标定淤地坝初次耕作的年代。

3) 淤地坝沉积剖面存在粒径变异的转折点,该点可用来衡量水沙动力条件和沟道比降对泥沙粒径分布所起的作用,对流域侵蚀环境演变有一定的指示作用,可以解释流域侵蚀强度和沉积环境的变化。

在广泛分布在黄土丘陵沟壑区的淤地坝内,如何利用坝地沉积泥沙自身理化性质的剖面变化规律,研究流域侵蚀环境演变,对于无法利用 ^{137}Cs 时标功能的流域有着重要的意义。本文仅分析了沉积剖面的粒径特征,尝试着用粒径和降雨资料等反演流域侵蚀环境的变化,其能否应用于黄土高原的其他小流域还有待于进一步研究验证。

参考文献:

[1] 冉大川,李占斌,罗全华,等.黄河中游淤地坝工程可持续减沙途径分析[J].水土保持研究,2013,20(3):1-5.
[2] 李莉,李聚方,孙维营,等.韭园沟流域典型淤地坝淤粗排细作用研究[J].中国水土保持,2010(9):54-55.
[3] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施分类[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.

[4] 冉大川,张志萍,罗全华,等.大理河流域1970—2002年水保措施减洪减沙效益深化分析[J].水土保持研究,2011,18(1):17-23.
[5] 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.
[6] Zhang X B, Wen Z M, Feng M Y, et al. Application of ^{137}Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of the Hilly Loess Plateau, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(2): 254-260.
[7] 魏霞,李占斌,李勋贵,等.淤地坝坝地淤积与侵蚀性降雨的灰色关联分析[J].安全与环境学报,2007,7(2):101-104.
[8] 薛凯,杨明义,张风宝,等.利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史[J].核农学报,2011,25(1):115-120.
[9] Zhang X, Walling D E, Yang Q, et al. ^{137}Cs budget during the period of 1960s in a small drainage basin on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 86(1):78-91.
[10] 张风宝,薛凯,杨明义,等.坝地沉积旋回泥沙养分变化及其对小流域泥沙来源的解释[J].农业工程学报,2012,28(20):143-149.
[11] 李勋贵,李占斌,魏霞.黄土高原淤地坝坝地淤积物两个重要物理特性指标研究[J].水土保持研究,2007,14(2):218-220.
[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] Wei J, Zhou J, Tian J, et al. Decoupling soil erosion and human activities on the Chinese Loess Plateau in the 20th century[J]. Catena, 2006, 68(1):10-15.
[14] 曹樱子,王小丹.藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数特征[J].山地学报,2014(4):438-443.
[15] 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.
[16] 李占斌.黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究[J].西安理工大学学报,1996,12(3):177-183.
[17] 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):90-92.
[18] 张汉雄.黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J].地理学报,1983,38(4):416-425.
[19] 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.
[20] 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.