

黄土丘陵区近 10 年典型小流域对侵蚀环境演变的泥沙响应

张宁宁, 刘普灵

(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: 针对近年来黄河泥沙的锐减现状, 以 2003—2011 年国家退耕还林工程实施效果的显现期为背景, 采用典型流域剖析的方法, 深入研究了近 10 a 来黄土丘陵区典型流域侵蚀泥沙总量以及年际变化量。结果表明: 小流域土壤侵蚀强度大幅度下降, 年平均侵蚀模数不足 $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 下降至退耕还林还草工程实施以前的 8.3%; 如不考虑建坝初期 2003 年的特殊状况, 小流域 2004—2011 年侵蚀模数平均值为 $144.93 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 为退耕前的 2.4%。这表明在新的侵蚀环境背景下该小流域的侵蚀强度已稳定在轻度以下。

关键词: 侵蚀环境; 侵蚀量; 侵蚀模数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0106-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.019

Sediment Response to Erosive Environment Evolution of a Typical Watershed in the Loess Hilly Region in the Past 10 Years

ZHANG Ningning, LIU Puling

(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, Shannxi 712100)

Abstract: Sediment discharge significantly decreased in the Yellow River because of the effect of the ‘grain-for-green project’ (GGP). The typical watershed parsing method was applied to obtain the sediment yield and analyze the variation of the annual erosion modulus in a typical watershed in the loess hilly-gully region between 2003 and 2011. The results indicated that sediment yield from the watershed declined dramatically, and the average erosion modulus was less than $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, which was 8.3% of that before the implementation of GGP. Moreover, when excluding the data in 2003 because of the influence of the beginning of dam implement, the average erosion modulus during 2004—2011 was $144.93 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, which was only 2.4% of that before the implementation of GGP, suggesting that there was a mild erosion in this watershed after the GGP. This study proved the significance of the effects of controlling sediment yield of the GGP, and it may help the planners and managers to make proper decisions for the control of soil erosion from watersheds under similar conditions.

Keywords: erosive environment; erosion amount; erosion modulus

黄土高原侵蚀环境的演变是导致黄河水沙时空变化的最直接原因^[1]。在气候变化及人类活动的共同作用下,特别是自 1999 年国家大规模退耕还林(草)工程实施以来^[2-4],黄河泥沙从上世纪的 16 亿 t 锐减至近年来的 1.8 亿 t^[5-6],其形成的原因和内在机理^[7-12]也成为许多学者关注的重点。

淤地坝是黄土高原小流域治理土壤侵蚀过程中的重要的工程措施^[13]。淤地坝在拦蓄泥沙的同时,也记载了小流域的历次侵蚀产沙事件,同时储存了小流域大量的环境演化信息,是反演小流域侵蚀产沙过程的主要依据^[13-14]。根据淤地坝所记录的环境演化

信息,利用该流域 24 h 累计降雨量资料,可以很好地破译淤地坝库泥沙沉积过程^[15-16]。

但是从目前的研究结果看,以往研究大部分主要是针对较长时间尺度、相对较慢的生态环境变化^[17-18],并且主要使用的是已经淤满并冲毁的大坝^[19-20],而在退耕还林还草工程实施后的短时间、高速度的流域生态环境治理特别是自然恢复过程的流域侵蚀产沙影响机理报道较少。

因此本文选取一座退耕还林(草)效果显现初期 2003 年的新建大坝作为研究对象,采用典型流域剖析的方法,深入研究近 10 年以来黄土丘陵区典型流

域泥沙侵蚀量的变化。期望能够深度认识新侵蚀背景下的泥沙响应机制,并为黄土高原生态环境建设提供重要科学依据,同时为黄土高原生态建设工程实施效果评估提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究小流域位于延安市南3 km处,属于燕沟流域一条支沟。流域面积5.23 km²,主沟道长4.85 km,加权平均沟道纵比降2.8%。建坝前该区植被稀疏,水土流失严重,多年平均侵蚀模数为6 000 t/(km²·a)。流域1999年开始大面积实施退耕还林(草),并于2002年全部完成。退耕总面积1.03 km²,退耕地的植被以乔木(刺槐)为主,灌木(柠条、沙棘等)次之,并多以乔—灌—草结合的模式出现。流域出口处于2003年新建了一座闷葫芦坝—湫沟大坝,该大坝坝高28.5 m,总库容118.47万m³,拦泥库容59.11万m³。从2003年大坝建成运行以来,理论上再没有泥沙外泄,是本研究的理想研究区。

1.2 样品采集及处理

1.2.1 样品的采集 坝前样品的采集主要考虑以下原则:一是样品的代表性,根据建坝前已知的地形地貌,并参考已知的大坝库容曲线选择采样点,由于沟道较短,而临近坝前区域基岩外露且相对平坦,因此我们假设流域上方来沙被均匀的平铺在了坝前库区底部,然后在坝前沉积泥沙最深处选择了3个采样点,1个主点,2个副点,试验获得的3个沉积泥沙剖面样品厚度的一致性也证实了这一点;二是要具有可行性,为了能够在野外5 m水深以下采集到完整的沉积剖面,我们在室内反复做了预备试验,证明采用的方法是可行的。2012年5月进行了坝前沉积剖面样品的采集,采样工具为内径42 mm的钢管,根据采样点位置的水深,当场焊接和截取样管。采样人员划2 m×4 m的塑钢船直接在水上采样,采样深度以到达基岩为准,共获得3个完整的沉积泥沙剖面样品,样品在现场根据钢管中泥沙厚度截取后,最上端塞紧封严,带回实验室备用。

1.2.2 土壤样品的处理 采集的淤积泥沙剖面样品带回实验室后,打开密封的上端,直立放置自然风干,2013年4月观察土壤风干至凝固微湿润状态,沿钢管正中的轴线两端完全打开成两半,打开过程中要尽量保证内部土柱不受影响。打开后将土柱按0.5 cm的厚度分层取样,分得的土壤样品自然风干研磨过2 mm筛,用Mastersizer 2000激光粒度仪进行土壤粒径分析,测量土壤粒径的体积百分比,取样速度为1 000次/s,单个样品的测定时间为5 min,测定前去除土壤有机质和碳酸盐,上机前用六偏磷酸钠溶液分散土壤溶液,测量范围为0.02~2 000 μm,每个土样重复测定3次。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 小流域降雨资料获得 小流域的降雨资料来自中国气象网数据共享平台延安站点的气候资料数据集和课题组小流域多年实测降雨资料,主要使用的是小流域2003—2011年年平均降雨量资料和24 h累计降雨量资料。运用谢云等^[21]建立的侵蚀性降雨标准来筛选研究小流域的侵蚀性降雨以及典型暴雨。

1.3.2 湫沟大坝库容曲线的确定 利用等高线法确定淤地坝随水位变化的累积库容曲线(图1),该库容曲线为建坝前由水利部门确定。

1.3.3 沉积旋回土壤容重模拟曲线的测定 本文中因为研究淤地坝仍然在淤积过程中,所以无法直接采集每一淤积层的泥沙进而测量其容重。因此我们将采集到的沉积泥沙剖面分层后获得的土壤样品风干并分别称量其干湿状态下的质量,然后利用如下公式计算沉积旋回土壤容重大小。

$$\rho = m/V(1 + \Phi) \quad (1)$$

式中: ρ 为土壤容重(g/cm³); m 为沉积泥沙剖面分层所得土壤样品的湿土质量(g); V 为样品土柱的体积(cm³),在这里为6.92 cm³; Φ 为分层后土壤样品质量的含水量(%)。

根据所有分层样品土壤容重的实测值,模拟得到淤地坝沉积泥沙剖面随深度变化的土壤容重曲线(图1)。

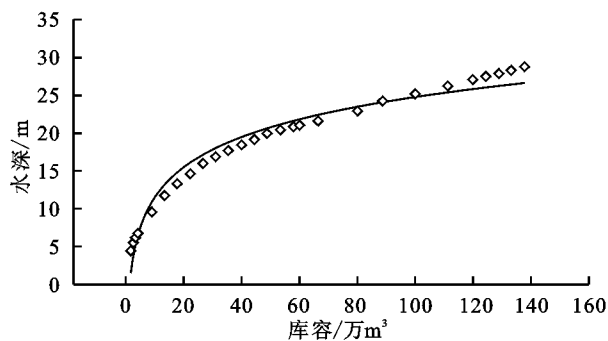


图1 湫沟大坝库容曲线和坝前沉积泥沙剖面容重模拟曲线

1.3.4 土壤侵蚀模数的计算 大坝沉积旋回层泥沙沉积量计算公式为:

$$A_i = V_i \times \rho_i \quad i=1,2,3,\dots,14 \quad (2)$$

$$A = \sum_{i=1}^{14} A_i \quad (3)$$

式中: A_i 为第 i 个沉积旋回的泥沙沉积量(t); V_i 为第 i 个沉积旋回的土壤体积(cm^3); ρ_i 为第 i 个沉积旋回的土壤容重(g/cm^3); A 为坝前沉积的泥沙总量(t)。

小流域的土壤侵蚀模数计算公式为:

$$M_i = A_i \div (S \times a) \quad (4)$$

式中: M_i 为第 i 年土壤侵蚀模数($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); A_i 为第 i 年的侵蚀沉积泥沙总量; S 为小流域的流域面积(km^2); a 为小流域的侵蚀时间(a)。

1.3.5 数据处理 利用 SPSS 19 进行数据描述性统计分析及相关性分析, 利用 Sigmaplot 12.5 进行软件作图, 利用 Excel 2007 进行表格制作。

2 结果与分析

2.1 小流域 2003—2011 年侵蚀性降雨特征

评价侵蚀性降雨的标准主要有雨量, 平均降雨强度和最大 30 min 雨强, 但由于平均降雨强度和最大 30 min 降雨强度的测定比较困难, 因此本文仅仅用雨量来筛选研究小流域的侵蚀性降雨事件。运用谢云等^[21]建立的侵蚀性降雨标准, 将研究小流域筛选侵蚀性降雨的雨量标准定位为 10 mm, 暴雨标准为

55 mm。运用这一标准来筛选试验小流域 2003—2011 年期间有可能造成土壤侵蚀的降雨事件。

由图 2 可知, 研究区 2003—2011 年期间侵蚀性降雨总次数为 151 次, 平均降雨频率 16.8 次/a, 其中 2003 年, 2007 年的侵蚀性降雨次数最多, 分别是 26 次和 24 次, 24 h 累计降雨量 ≥ 55 mm 的次降雨次数共 11 次, 分别为 2003-08-25/26, 2004-06-29, 2005-07-01, 2005-09-19, 2006-07-02, 2007-07-25, 2007-07-28, 2007-08-29, 2009-08-25, 2010-08-18 和 2010-08-21, 多年 24 h 累计降雨量最大值出现在 2003-08-25/26, 为 90.4 mm (图 3)。此外, 可以明显发现小流域的侵蚀性降雨事件以雨量 < 30 mm 的降雨为主, 而且从暴雨的时间分布上看, 小流域的暴雨时间主要集中在每年的 7 月和 8 月。

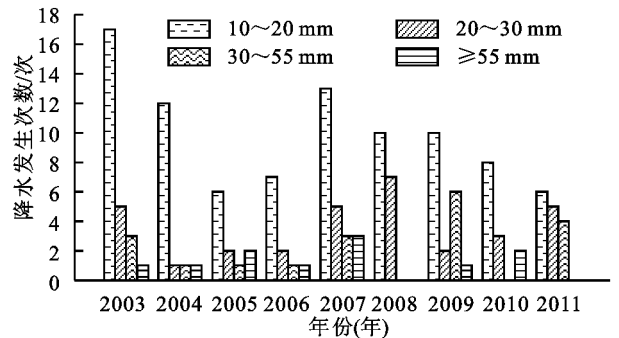


图 2 小流域不同年限不同降水事件发生次数分布

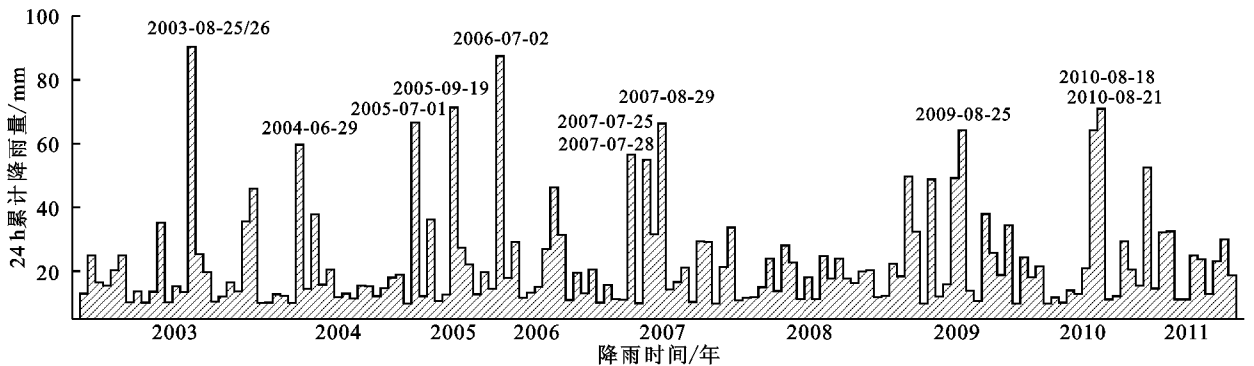


图 3 小流域 2003—2011 年的侵蚀性降雨事件 (24 h 累计降雨量 ≥ 10 mm)

2.2 淤沟大坝泥沙沉积旋回特征分析

观察采集得到的 3 个泥沙沉积剖面发现 3 个样品的厚度比较一致, 3 个泥沙剖面均分层得到 14 个沉积旋回。并且 3 个沉积剖面得到的旋回厚度之间存在着极显著的正相关关系 ($p < 0.01$)。也就是说我们可以认为每场降雨带来的泥沙被均匀的铺在坝前库区底部, 因此用这 3 个样品反应研究小流域的泥沙沉积状况是可信的。

2.2.1 沉积泥沙剖面样品粒度分析 泥沙颗粒对于侵蚀环境(暴雨强度)具有指示作用, 而平均粒径则是沉积物粒度分布重心所在, 总体上反映水动力的平均搬运能量^[22]。因此本文运用分析沉积泥沙剖面样品

中的颗粒分布特征和侵蚀性降雨事件对应关系的方法进行沉积剖面样品的沉积时间断定。

本文采用的粒度分级制度是科研常用制度—美国制。从淤沟大坝沉积剖面土壤各平均粒径的描述统计(表 1)可以看出, 平均粉粒含量(71.83%)最多, 粘粒含量(15.53%)次之, 砂粒含量(12.64%)最少, 各粒径在整个剖面深度上的变异系数大小依次为砂粒 $>$ 粘粒 $>$ 粉粒, 分析说明粘粒和粉粒虽然平均含量较多, 砂粒平均含量较少, 但是砂粒的变异性最大。另外, 粗颗粒对小流域的暴雨事件具有一定的指示作用。因此用平均砂粒百分含量的变化作为沉积旋回断代的主要参考。

表 1 湫沟大坝沉积剖面土壤各粒径平均百分含量的描述统计

土壤质地	最小值/%	最大值/%	均值/%	标准差/%	变异系数
粘粒	5.63	28.96	15.53	6.55	0.42
粉粒	56.34	84.61	71.83	5.79	0.08
砂粒	0.18	35.96	12.64	10.17	0.80

每场降雨事件形成的径流都会将控制坝上方小流域侵蚀产生的泥沙输入淤地坝,随径流进入淤地坝的泥沙在沉降过程中会产生分选作用。这种分选作用会导致淤积泥沙粗细相间分布,具有一定的沉积层理分布特点。在整个沉降的过程中,粗颗粒泥沙最先沉积,接着是粉粒,最后是黏粒,如此一个过程就将形成一个完整的沉积旋回。一般情况,下一个泥沙沉积旋回层对应一次侵蚀性降雨,但当 2 次降雨时间间隔很短时,侵蚀泥沙的沉积过程会被 2 次或连续的几次降雨所共同影响,根据大水对大沙^[23-24]的原则,较大

的降水其砂粒含量百分比也相应增大,在连续的降雨影响下虽然不能完全判别沉积泥沙来源于其中每次降雨的量,但是在泥沙粒径分布上会存在一定的变异性。由图 4 可知,淤地坝沉积剖面样品中的各粒径的组分发生了交替变化,即出现丰值—谷值交替出现的现象,存在粒度含量的转折点,这是由于典型侵蚀性降雨事件的侵蚀动力分选沉积作用造成的,这也就形成了该大坝库区的泥沙沉积旋回层结构。沿沉积剖面底层向上层观察发现,不同粒级颗粒在剖面中的百分含量变化表现为:砂粒由多变少后又变多并出现一个峰值,相对应的粉粒和粘粒的百分含量由少变多再变少,在砂粒峰值出现的深度出现一个低谷。从剖面分布规律来看,泥沙沉积旋回层的平均粒径出现极值处可能对应极端降水事件(图 3)。这也就成为本文泥沙沉积旋回时间序列建立的重要依据。

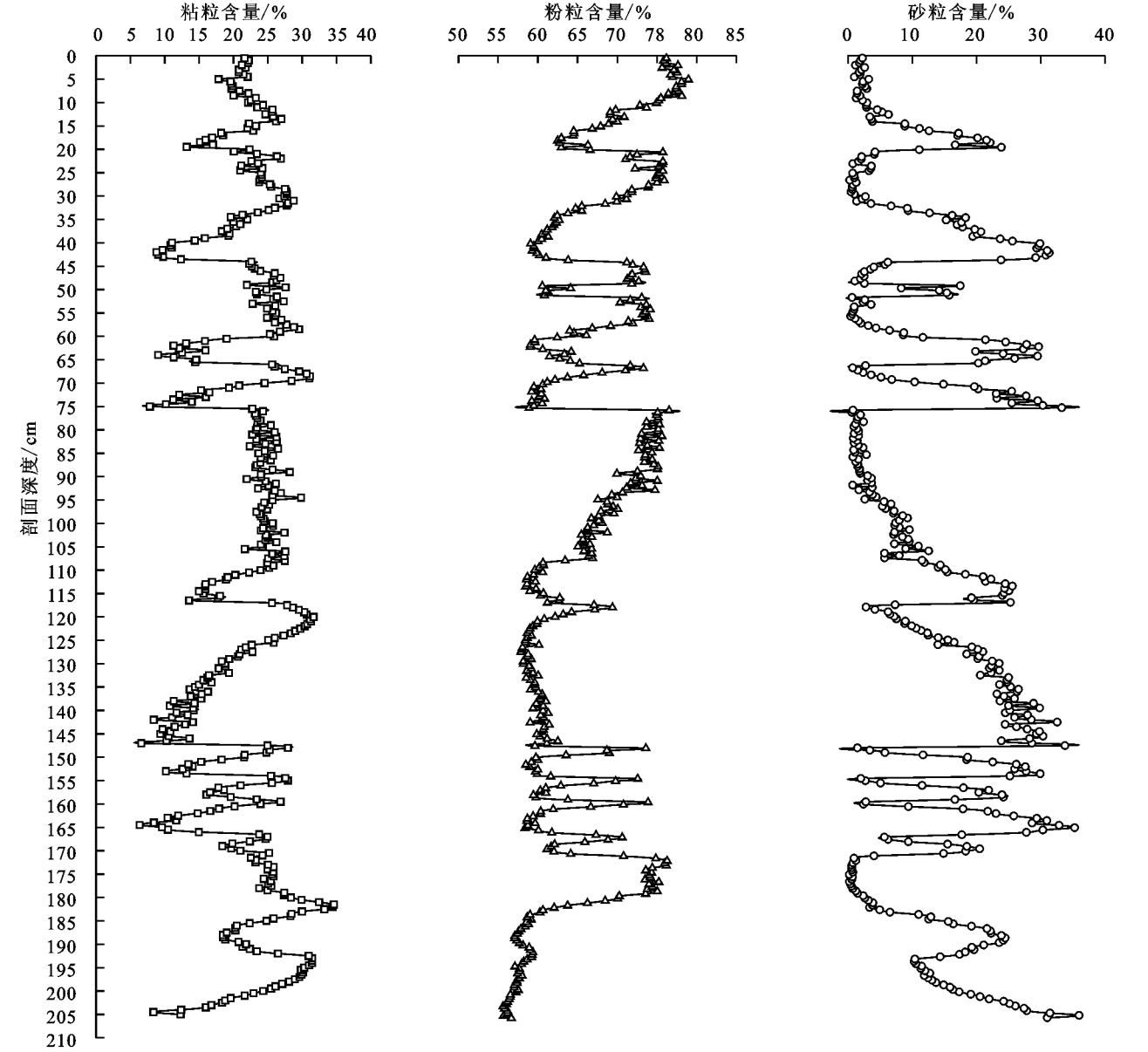


图 4 不同粒级颗粒平均含量随泥沙沉积剖面深度的变化

2.2.2 湫沟大坝泥沙沉积旋回特征分析 用沉积泥沙中砂粒平均百分含量随深度的变化来初步观察研究小流域近 10 a 的沉积规律。结果表明,研究区大坝单个旋回层次表现出泥沙表层细、底层粗的沉积规律,由多个沉积旋回构成的沉积剖面则出现泥沙由细到粗的周期性分布规律(图 4),而且泥沙的粗细层次分界极其明显。这一结果与汪亚峰等^[18]对黄土高原的流域淤地坝泥沙粒度的研究结果一致。本研究依据沉积剖面土壤样品砂粒平均百分含量的峰值变化进行旋回分层。

观察自然风干后的沉积泥沙剖面样品,整个剖面样品的沙层和泥层的分界裂隙清晰可见。由图 4 可知,沉积剖面的砂粒含量存在 14 个明显的最大值的转折点,这 14 个转折点就成为流域沉积泥沙旋回的分层基础。最底层 205 cm 处出现了第一个砂粒含量的峰值,直到 192 cm 深度出现谷值,在此同时粉粒分别在 205 cm 和 192 cm 深度出现谷值和峰值,而黏粒虽然变化不明显,但是于 192 cm 深度也出现一个峰值。依次类推,随着泥沙的沉积,这种现象出现循环重复,我们也可以依次分析得到小流域 2003—2011 年的沉积泥沙旋回特征(图 5)。由图 5 可知,2003—2011 年,共淤积 14 层,每年淤积的层次不同,年平均淤积层次为 1.56 层。每个旋回层的淤积厚度不同,差异明显较大,变化范围从几厘米到几十厘米,且每个旋回中泥层和沙层的厚度也各不相同。其中 S1, S2, S5, S6, S7, S8, S11, S13, S14 旋回的厚度明显较大,厚度分别为 20, 23.5, 14.5, 9.5, 41.5, 30.5, 7.5, 22, 13 cm。许多研究表明黄土高原几年的土壤侵蚀往往是几次暴雨造成的。而黄土高原暴雨造成的侵蚀量占总侵蚀量的 90% 以上^[25-26]。因此,从本文旋回层厚度推测,再依据大来水对应大量来沙的基本规律,说明这 9 个典型的旋回层次可能是 9 次强降雨作用的结果。

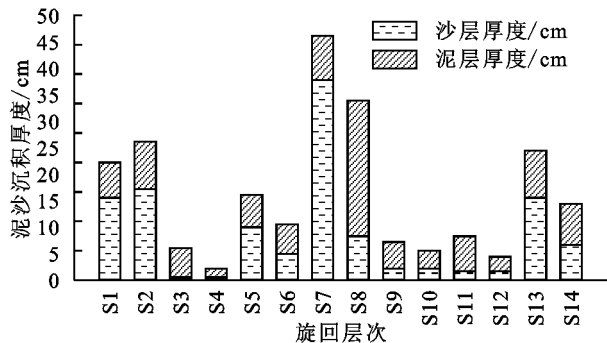


图 5 坝前沉积泥沙沉积旋回特征 (2003—2011 年)

2.3 小流域土壤侵蚀历史演变过程

2.3.1 小流域土壤侵蚀时间序列的建立 研究了沉积剖面中平均砂粒百分含量和研究小流域 2003—2011 年的 24 h 累计降雨过程资料的对应关系,发现每场典型的大雨之后沉积泥沙的砂粒含量都会迎来一个峰值,

典型大暴雨与砂粒含量变化峰值之间有良好的相关性,由此可以推断典型泥沙沉积旋回的具体淤积时间。其中 9 个典型的旋回层次可能对应了 9 次典型的暴雨事件,从小流域的降雨特征中发现 2003—2011 年 24 h 累计降雨量 ≥ 55 mm 的次降雨次数共 11 次,从时间上看 2007-07-25 和 2007-07-28 以及 2010-08-18 和 2010-08-21 的时间间隔特别短,所以这种时间相近的降雨分别对应 2 个典型的旋回层次。因此,9 个典型泥沙旋回与 11 次典型降雨事件具有很好的对应关系。根据图 3 和图 4 中坝前沉积泥沙剖面的平均砂粒百分含量随沉积深度的变化峰值和特大暴雨事件的对应关系建立了小流域侵蚀沉积旋回的淤积时间序列,根据建立的时间序列可以得到每个沉积旋回层的沉积时间,从而确定每年包含的沉积旋回层。而每年的侵蚀沉积总量就为包含的旋回层沉积量的总和,再利用方程(4)就可以得到每年的年侵蚀模数。

2.3.2 小流域土壤侵蚀历史演变过程 小流域年侵蚀模数的结果表明,小流域的土壤侵蚀模数 2003 年最高,可达 $3\,320.38\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。然而从 2004 年开始骤降,随后几年的时间里均稳定在 $200\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以下,最低值出现在 2008 年,仅为 $94.13\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。由表 2 中可以看出,小流域 2003—2011 年的泥沙侵蚀总量为 $23\,429.51\text{ t}$,而侵蚀模数 9 a 平均值为 $497.76\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,为轻度侵蚀。这一结果相比退耕还林还草工程实施以前该区域的 $6\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[27],下降至原来的 8.3%,平均年下降率 10.2%。另外,由图 5 可知,除 2003 年的侵蚀模数高达 $3\,320.38\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以外,2004—2011 年的均不足 $200\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,均为轻度侵蚀。

表 2 研究小流域土壤侵蚀历史演变过程

年份	总侵蚀量/t	平均土壤侵蚀模数/ ($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$)
1999 年以前	—	6000.00
2000—2002 年	—	—
2003—2011 年	23429.5	497.96
2004—2011 年	6063.9	144.93

注:“—”指的是没有获得准确数据。

分析小流域的侵蚀环境资料发现,造成 2003 年侵蚀剧烈的原因主要有 2 方面:一是大坝刚刚修建,修建过程中整理沟道以及库区周围区域造成的土体松动,雨季来临时这些被松动的土体很容易被侵蚀并搬运至坝前;二是 2003 年小流域的侵蚀性降雨次数较多,一年中发生的侵蚀性降雨达 26 场,降雨事件从 3 月到 10 月,但是降雨量较大的事件集中于 6—9 月,且多年降雨量最大的降雨事件也发生在这一年的 8 月份(图 2),所以更容易导致侵蚀事件的发生。因此如果不考虑 2003 年这一特殊事件,2004—2011 年泥沙侵蚀总量仅为 $6\,063.9$

t,而侵蚀模数平均值为 $144.93 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,也就是如果不将2003年计算在内的话,本研究小流域的侵蚀模数下降幅度更大,为退耕前的2.4%。徐学选等^[28]针对燕沟流域的输沙模数的研究也表明2004年以后,流域输沙模数大幅度降低,并降低至流域治理以前的1%。也就是说退耕还林(草)工程在本研究小流域大面积实施的5年后,即2004年,该小流域的土壤侵蚀程度稳定在了轻度侵蚀以下。观察整个小流域的治理过程,1999年以前主要是基本农田建设,这一治理使得小流域山上的大部分的耕地类型由陡坡耕地转化为机修梯田,因此,明显的导致小流域的土壤侵蚀开始减少并下坡的流失土壤开始减少;退耕还林(草)阶段(1999—2003年),这种减少趋势开始加强;而小流域2002年退耕还林(草)共作全部完成后,进入了退耕完成后的维护阶段(2004—2011年),这一阶段小流域从峁顶—坡面—沟道的整个系统均实施了因地制宜的水保措施,并且进行了严格的后期管理,这也促使前期的林草措施的效果进一步得到了充分的发挥,使得小流域的土壤侵蚀大幅度降低。

3 结论

(1)研究区2003—2011年期间侵蚀性降雨总次数为151次,平均降雨频率16.8次/a,其中侵蚀性降雨次数较多的年份出现在2003年和2007年,分别是26次和24次。其中,24 h累计降雨量 $\geq 55 \text{ mm}$ 的次降雨次数共11次。

(2)坝地沉积剖面存在粒径变异的转折点,这个点可用来衡量小流域的水动力条件对小流域侵蚀沉积泥沙的影响。

(3)2003—2011年,共淤积14层,每年淤积的层次不同,年平均淤积层次为1.56层。每个旋回层的淤积厚度均不同,差异明显。小流域9a的泥沙侵蚀总量为23 429.51 t,而侵蚀模数9a平均值为 $497.76 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,下降至退耕前的8.3%,平均年下降率10.2%,另外从2004年开始,小流域的土壤侵蚀模数均不足 $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,均为轻度侵蚀,虽然年际之间有波动,但很小可以忽略不计。这表明在新的侵蚀环境背景下该小流域的侵蚀强度已稳定在轻度以下,同时证明退耕还林(草)政策的实施对减少区域土壤侵蚀的作用是显著的。

参考文献:

- [1] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J].自然杂志,2008,30(1):12-16.
- [2] 刘成,王兆印,隋觉义.我国主要入海河流水沙变化分析[J].水利学报,2007,38(12):1444-1452.
- [3] 邹振华,李琼芳,夏自强,等.人类活动对长江径流量特性的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35

(6):622-626.

- [4] 粟晓玲,康绍忠,魏晓妹,等.气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(2):153-159.
- [5] 刘成,王兆印,隋觉义.黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J].水利水电科技进展,2008,28(3):1-7.
- [6] 穆兴民,王万忠,高鹏,等.黄河泥沙变化研究现状与问题[J].人民黄河,2014,36(12):1-7.
- [7] Zhao G J, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 2015, 241(7): 343-352.
- [8] 高海东,李占斌,李鹏,等.梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析[J].地理学报,2012,67(5):25-34.
- [9] 邹兵华.黄土高原小流域淤地坝控制坡沟系统土壤侵蚀的作用研究[D].西安:西安理工大学,2009.
- [10] Fu B J, Yu L, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [11] 李志,刘文兆,杨勤科,等.黄土沟壑区小流域土地利用变化及驱动力分析[J].山地学报,2006,24(1):27-32.
- [12] 据彤军,刘普灵,王栓全,等.黄土区不同地类坡面水沙动态过程及其发生机理的模拟实验研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1942-1947.
- [13] 薛凯.利用坝地沉积旋回研究黄土高原小流域泥沙来源演变规律[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院,2011.
- [14] 魏霞,李占斌,李勋贵.黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李奎.基于聚淤泥沙沉积分析与RUSLE模拟的黄土洼小流域土壤侵蚀研究[D].西安:陕西师范大学,2014.
- [18] 汪亚峰,傅伯杰,陈利顶,等.黄土高原小流域淤地坝泥沙粒度的剖面分布[J].应用生态学报,2009,20(10):2461-2467.
- [19] 汪亚峰,傅伯杰,侯繁荣,等.基于差分GPS技术的淤地坝泥沙淤积量估算[J].农业工程学报,2009,25(9):79-83.
- [20] 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.
- [21] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [22] 颜艳,岳大鹏,李奎,等.1953—2010年黄土洼天然淤地坝内洪水沉积物粒度旋回特征[J].水土保持通报,2014,34(6):349-354.