

# 砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析

蒋凯鑫<sup>1,2</sup>, 于坤霞<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1,2,3</sup>, 白璐璐<sup>1,2</sup>, 谢梦瑶<sup>1,2</sup>, 刘昱<sup>1,2</sup>

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;

2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048;

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:**黄土高原地区的淤地坝是拦减入黄泥沙的关键措施,尤以对泥沙具有绝对控制的“闷葫芦”淤地坝为甚。为研究淤地坝对侵蚀泥沙的拦蓄作用,以砒砂岩区皇甫川流域园子沟淤地坝为研究对象,采集坝地淤积剖面及沟间地、沟谷地表层样品,对沉积旋回进行断代分析,计算泥沙贡献率,反演其淤积过程。结果表明:坝地沉积泥沙粒径分布以2~0.05 mm砂粒为主,其次为粉粒、黏粒,砂粒中以极细砂和细砂占比最多。园子沟坝控流域内侵蚀性降雨事件对应的最小日降雨量为22.8 mm;淤地坝运行可划分为2个阶段,前期主要依靠坝体拦蓄泥沙,后期随着拦蓄泥沙的增多,减蚀作用凸显。坝地沉积泥沙主要来源为沟谷地,贡献率达71.4%,沟间地为28.6%,其中沟间地侵蚀产沙并非受植被唯一影响,在降雨量>45.4 mm时,地形因素会限制侵蚀的加剧。

**关键词:**皇甫川流域;淤地坝;侵蚀性降雨;沉积旋回;泥沙贡献率

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2020)01-0047-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.007

## Sediment Characteristics and Sources Analysis of Typical Check Dam in Pisha Sandstone Area

JIANG Kaixin<sup>1,2</sup>, YU Kunxia<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2,3</sup>, BAI Lulu<sup>1,2</sup>, XIE Mengyao<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2.Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster

Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In the Loess Plateau, as the significant measure for preventing and reducing the sediment into the Yellow River, check dams are playing an essential role in sediment retention and farmland-making. In order to study the effect of check dam on the changes of soil erosion, sediment yield and sources in dam-controlled watershed, a check dam named Yuanzigou in Huangfuchuan watershed of Pisha sandstone area was selected as the research object. The soil samples were collected on the check dam profile and the surface of the slopes including land between gullies and gully region. The sediment deposition records of sediment couplets were analyzed by identifying the relationship between rainfall events and sediment couplets. The sediment sources were assessed and the changes of the sediment yield intensity were analyzed. The particle size analysis indicated that the sediment particle size distribution of the sediment profiles in the check dam mostly concentrated in the range of 0.05~2 mm sand, in which the proportion of very fine sand and fine sand was the most, followed by silt and clay. According to the corresponding relationship between rainfall events and sediment couplets, the minimum daily rainfall corresponding to erosive rainfall events in the dam-controlled watershed was 22.8 mm. And the sediment deposition process was divided into 2007—2013 and 2013—2016. In the early stage, it mainly depended on the dam body to trap sediment, and in the later stage, as more sediment is trapped the effect of erosion reduction was prominent. The results of sediment contribution analysis indicated that 71.4% of the sediment was contributed by the gully region and 28.6% by land between gullies. The erosion and sediment yield of land between gullies were not only affected by vegetation. When the daily rainfall was more than 45.4 mm, topographic factor would limit the the further occurrence of erosion.

收稿日期:2019-07-23

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402404,2016YFC0402407);国家自然科学基金项目(41330858)

第一作者:蒋凯鑫(1994—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事流域侵蚀动力学研究。E-mail:jiangkaizn@qq.com

通信作者:于坤霞(1989—),女,河南新乡人,博士,讲师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:yukunxia@126.com

**Keywords:** the Huangfuchuan basin; check dam; erosive rainfall; sedimentary cycle; sediment contribution rate

黄河以水少沙多、水沙异源而著称<sup>[1]</sup>。2000 年以来,黄河水沙变化显著,潼关水文站实测多年平均输沙量由 1919—1959 年的 15.92 亿 t 降至 2000—2012 年的 2.76 亿 t,减幅达 82.7%<sup>[2]</sup>。赵阳等<sup>[3]</sup>对 1950—2016 年黄河干流及主要支流水文气象数据序列采用双累积曲线法分析发现,人类活动是黄河兰州—潼关区间泥沙锐减的主要驱动因素,平均贡献率达 91.52%,其中水保措施中梯田、淤地坝等具有重要影响。淤地坝是指在水土流失地区各级沟道中,以拦蓄泥沙为目的而修建的水土保持工程措施,其拦蓄泥沙形成的平整土地叫做坝地<sup>[4]</sup>。截至 2015 年,黄土高原潼关以上建有淤地坝 56 422 座,其中库容 50~500 万 m<sup>3</sup> 的骨干坝 5 658 座、库容 10~50 万 m<sup>3</sup> 的中型坝 11 248 座、库容 1~10 万 m<sup>3</sup> 的小型坝 39 516 座<sup>[5]</sup>。考虑到淤地坝在减少入黄泥沙方面的重要作用,众多学者开展了大量的研究,淤地坝的关注点也从 1990 年代的建设数量、拦淤损坏调查发展到 2000 年之后的减水减沙效益<sup>[6]</sup>、坝地沉积泥沙来源<sup>[7]</sup>、减蚀作用<sup>[8]</sup>和失效判断标准<sup>[9]</sup>等研究。因淤地坝坝地沉积泥沙有效记录着对应场次侵蚀产沙降雨事件汇集在坝地的侵蚀泥沙的相关信息<sup>[10]</sup>,外加指纹识别方法<sup>[11]</sup>的应用,关于坝控流域内泥沙来源的确定成为土壤侵蚀和泥沙输移的热点问题。当前关于淤地坝坝地沉积泥沙的研究多集中于单场或几场降雨事件对应的沉积泥沙<sup>[12]</sup>、坝地表层固定厚度的沉积泥沙<sup>[13-14]</sup>、2000 年前已淤满“闷葫芦”淤地坝坝地沉积泥沙<sup>[15-16]</sup>的研究。自 1999 年实施退耕还林还草、2003 年水利部实行淤地坝作为其一的“亮点工程”之后,黄土高原地区土壤侵蚀大大减少,水沙关系进一步发生变化<sup>[17-18]</sup>,而关于此时期新修淤地坝的研究相对较少。作为黄河多沙粗沙的主要来源区,同时也是黄土高原地区侵蚀最为剧烈和治理难度最大的砒砂岩区<sup>[19]</sup>,经过世纪初以来退耕还林还草及淤地坝修建等项目的实施,流域生态建设取得了显著成效。为了深入了解淤地坝对砒砂岩地区坝控流域内侵蚀产沙的影响,本文选取砒砂岩区皇甫川流域特拉沟主河道右岸一处于沟口且坝地未被耕作的单坝系“闷葫芦”淤地坝,采集坝地泥沙沉积旋回及坡面土壤表层样品,建立沉积旋回与产沙性降雨事件的对应关系,进而反演淤地坝建坝以来的淤积过程及坝控流域内不同侵蚀部位侵蚀产沙的变化特征,探究淤地坝建设对坝控流域侵蚀产沙输沙的影响,衡量淤地坝拦蓄泥沙的作用及建设的必要性,避免淤地坝拦沙作用未充分发挥或对水沙的过分拦截,为提高淤地坝的效益提供一定的参考价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

皇甫川流域位于黄河中游河龙区间的右岸上段,是黄河流域一级支流和主要的多沙粗沙区<sup>[20]</sup>。流域内地势高差大,岸坡陡峭,砒砂岩大面积出露,暴雨侵蚀强烈,沟道发育,其多沙、粗沙、水土流失严重,在我国乃至世界罕见。特拉沟流域是皇甫川流域干流纳林川左岸一级支沟,流域面积 128.2 km<sup>2</sup>,属沙质丘陵沟壑区,见图 1。流域内地表物质多为黄土、风沙土和砒砂岩,零星分布有栗钙土。流域出口处地势平坦,两岸均为川台地。流域内沟谷地约占总面积的 25%<sup>[21]</sup>。园子沟淤地坝位于特拉沟主沟道右岸,2006 年 10 月竣工,坝控面积 1.52 km<sup>2</sup>,总库容 25 万 m<sup>3</sup>,淤地面积 3.4 hm<sup>2</sup>,坝高 18 m。坝控流域内,沟道两侧岸坡较陡,支沟短、深、窄,土地利用类型以草地为主,面积占比达 90%以上。

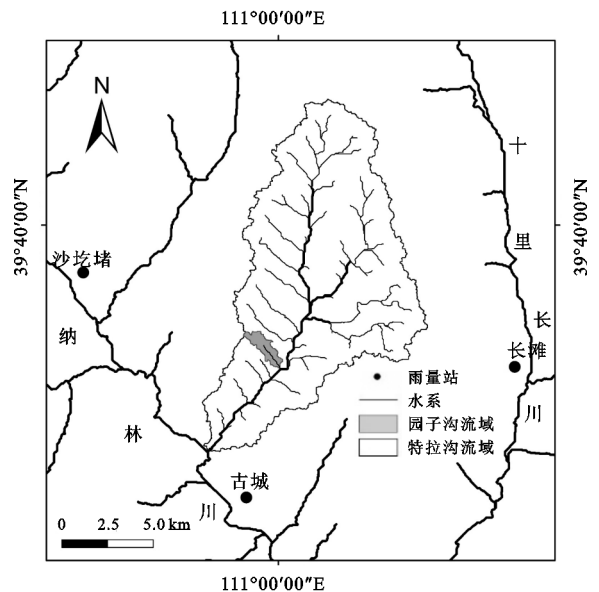


图 1 研究区位置

### 1.2 方法及样品采集

2017 年 7 月中旬,在皇甫川流域干流纳林川左岸支流特拉沟流域的主沟道右岸,选取一地处沟口、主沟发育、坝地未种植农作物的单坝系“闷葫芦”淤地坝园子沟淤地坝,测量淤地坝上游坡比、坝顶与坝地高差,沿其坝地中泓线前、中、后选取 3 个无支沟汇入的采样点,分别采集坝地沉积旋回原状土柱,同时在坝中沉积旋回采样点旁边再次打钻使用 100 cm<sup>3</sup> 不锈钢取土环刀采集土壤容重样品,并称重、记录。在坝控流域内,选取典型沟间地、沟谷地,沿径流线上、中、下 3 点,取其表层 0—5 cm 土壤样品。沟壁样品则采用铁铲刮取的方式获取。所有样品密封、编号、记录后,带回土壤化学实验室进行测试分析。

土壤容重样品置于烘箱内 105 °C 烘干至恒重、称重。坝地沉积旋回原状土柱室内阴干,自然断裂,通过土壤质地、颜色等分层,编号,测量厚度,装自封袋,记录。沟间地和沟谷地样品同采用自然阴干,装袋。样品粒径特征测定采用英国 Malvern MasterSizer 2000 激光粒度仪,取部分晾干且混合均匀的样品,过筛(2 mm),去根,称取 0.5 g,加 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,浸泡 24 h,超纯水稀释,静置,去除上清液,超声 30 s,测量。粒径按照美国制分类标准<sup>[22]</sup>分为极粗砂粒(2~1 mm)、粗砂粒(1~0.5 mm)、中砂粒(0.5~0.25 mm)、细砂粒(0.25~0.1 mm)、极细砂粒(0.1~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)。样品总有机碳(TOC)测定采用德国耶拿 multi N/C® 3100 TOC 分析仪,将样品风干,研磨,过筛(0.149 mm),称取 100.0 mg 置于进样舟,加 1 mol/L 盐酸浸泡 24 h,上机测试。样品总磷(TP)、总氮(TN)测定采用德国 DeChem-Tech. GmbH 公司 CleverChem 200 全自动间断化学分析仪。

### 1.3 数据处理

降水数据由特拉沟流域附近的沙圪堵、古城和长滩 3 个雨量站通过反距离权重法插值获得。反距离权重插值方法步骤为:一是计算各雨量站到采样点的距离;二是计算各个雨量站的权重,权重是距离倒数的函数;三是计算采样点的降水数据。计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} \quad (2)$$

式中: $P$  为采样点降水(mm); $\lambda_i$  为各雨量站权重,1; $d_i$  为各雨量站到采样点的距离(m)。

考虑到本文区域降水数据为日数据,采用章文波等<sup>[23]</sup>修正的 Richardson 日降雨侵蚀力模型计算特拉沟流域园子沟坝控小流域的降雨侵蚀力,该模型公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (3)$$

式中: $R_i$  为第  $i$  个半月时段内的降雨侵蚀力值((MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)); $P_j$  为半月时段内第  $j$  天的日降雨量,要求日降雨量 $\geq 12$  mm,否则以 0 计算,12 mm 与中国侵蚀性降雨标准相对应; $k$  为该半月时段内的天数,半月时段的划分以每月第 15 日为界,这样将全年依次划分为 24 个时段; $\alpha$ 、 $\beta$  为模型参数,根据区域降雨特征进行计算:

$$\beta = 0.8363 + 18.177/P_{d12} + 24.455/P_{y12} \quad (4)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (5)$$

式中: $P_{d12}$  为日降雨量 $\geq 12$  mm 的日均降雨量(mm); $P_{y12}$  为日降雨量 $\geq 12$  mm 的年均降雨量(mm)。

场次降雨对应的坝地沉积泥沙分布总体上呈现“上细下粗”的趋势<sup>[24]</sup>,同时在采样期间量取坝地淤积高程、淤地坝坝顶高程等数据,基于此本文将坝地沉积泥沙旋回与相应的降雨数据进行断代分析。沟间地、沟谷地对坝地沉积泥沙的贡献率,采用复合指纹识别方法。Walling 等<sup>[25]</sup>在计算泥沙来源时提出了复合指纹识别方法的 3 个步骤:一是通过非参数 Kruskal-Wallis H 检验筛选用于坝地沉积泥沙来源的指纹识别因子;二是采用多元逐步判别分析找到最佳指纹因子组合;三是利用多元混合模型定量计算坝地沉积泥沙各源地贡献率。该模型公式为:

$$R_{es} = \sum_{i=1}^n \{ [C_i - (\sum_{s=1}^m P_s S_{si})] / C_i \}^2 \quad (6)$$

$$\sum_{s=1}^m P_s = 1 \quad 0 \leq P_s \leq 1 \quad (7)$$

式中: $R_{es}$  为最小误差平方和; $C_i$  为沉积泥沙旋回中指纹识别因子  $i$  的浓度(mg/kg); $P_s$  为泥沙源地  $S$  的泥沙贡献百分比(%); $S_{si}$  为泥沙源地  $S$  中指纹识别因子  $i$  的平均浓度(mg/kg); $m$  为泥沙源地的数量(个); $n$  为指纹识别因子的数量。

本文采用拟合优度<sup>[26]</sup>(goodness of fit, GOF)来评估实测“源—汇”泥沙指纹因子属性值与模型判定的“源—汇”泥沙指纹因子属性值之间的相对差异,该评估公式为:

$$\text{GOF} = 1 - \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|C_i - \sum_{s=1}^m P_s S_{si}|}{C_i} \quad (8)$$

Motha 等<sup>[26]</sup>认为,当  $\text{GOF} > 0.8$  时,可以接受最优混合模型计算的结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积泥沙旋回剖面粒径特征

园子沟坝地沉积泥沙以砂粒为主,粉粒次之,黏粒最少。占比最多的砂粒进一步细分主要集中在极细砂(0.1~0.05 mm)和细砂(0.25~0.1 mm)。对坝地沉积泥沙的中值粒径  $D_{50}$  在水平方向和垂直方向进行分析。由图 2 可知,近坝处、坝中和远坝处的中值粒径均值相差不大,分别为 0.055、0.056、0.057 mm。坝控流域内沟间地采集土样的中值粒径  $D_{50}$  均值为 0.073 mm,沟壁  $D_{50}$  均值为 0.099 mm,支沟沟道  $D_{50}$  均值为 0.119 mm。皇甫川流域出口皇甫水文站对径流泥沙中值粒径的监测显示,1990—1996 年中值粒径为 0.046 mm<sup>[27-28]</sup>。这说明侵蚀性降雨事件形成的雨洪携带的泥沙沿程发生了沉降,而短、深、窄的支沟沟道在束窄雨洪过水断面的同时,也为两侧陡立沟壁的重力侵蚀创造了条件。淤地坝的修建有效拦截了  $> 0.05$  mm 的粗泥沙。垂直方向上,近坝处和远坝处的沉积泥沙  $D_{50}$  波动较坝中的变化大,这可能是因为坝中



位置采集的沉积旋回覆盖了更多的降雨事件,即较小的侵蚀性降雨事件带来的泥沙或无法到达坝前。

## 2.2 沉积泥沙旋回与降雨事件的断代分析

本文选取坝中采样剖面进行断代分析,根据粗泥沙的指示作用,划分了 24 场侵蚀性降雨事件与坝地泥沙沉积旋回的对应关系。从图 3 可以看出,坝地沉积泥沙主要来自于每年为数不多的几场强降雨,日降雨量  $P \geq 30.0$  mm 的侵蚀性降雨事件以占总侵蚀性降雨事件 57.1% 的比例贡献了坝地泥沙淤积总量的

72.4%,4 场日降雨量  $P \geq 50.0$  mm 的侵蚀性降雨事件贡献了坝地泥沙淤积总量的 23.2%。同时发现园子沟侵蚀性降雨事件对应的最小日降雨量为 22.8 mm,截至 2016 年底淤积比为 0.44。根据 2011 年底对准格尔旗辖区内皇甫川流域骨干坝的实地调查,发现 2004 年及之后建成的骨干坝淤积比例小于 0.1 的占比 95.7%,淤积比例小于 0.01 的占比 51.1%。这说明流域内生态建设提高了产沙性降雨事件对应的降雨量,延长了淤地坝的使用年限。

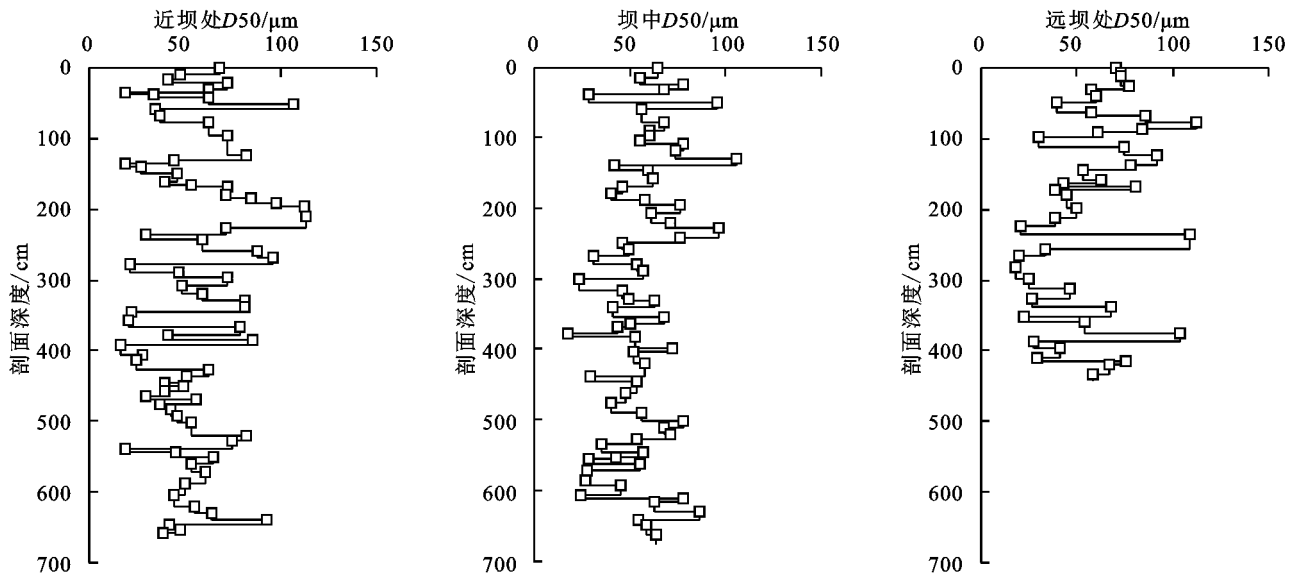


图 2 园子沟坝地采样剖面中值粒径  $D_{50}$  变化

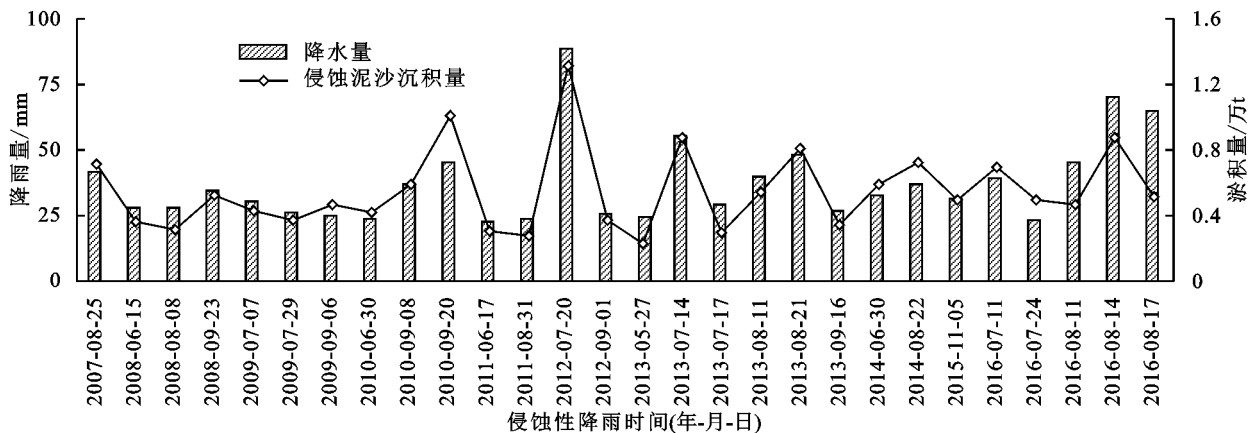


图 3 沉积泥沙旋回与降雨事件的对应关系

为分析建坝后年际之间侵蚀泥沙淤积变化,本文将产沙性降雨事件按照所在年份合并计算获得年侵蚀泥沙淤积量。由图 4 可知,园子沟建坝以来(2007—2016 年),坝控流域内侵蚀泥沙坝地沉积量年际变化大,年均侵蚀泥沙淤积量为 1.5 万 t,年均侵蚀模数为  $10\ 147\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。2011 年、2015 年流域内侵蚀性降雨事件分别为 2,1 场,泥沙淤积量较少,同时特拉沟流域把口站未监测到输沙量;2013 年、2016 年汛期(6—9 月)降水量较多且其雨强较大,导致侵蚀泥沙淤积量显著增加,园子沟坝控流域侵蚀模数超过  $20\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。这说明在当前该研究流

域的下垫面条件下,产沙性降雨事件对应的日降雨量虽提高至 22.8 mm,但当遭遇日降雨量  $> 22.8$  mm 的降雨事件时,坡面植被的减蚀作用相对有限,流域侵蚀泥沙主要依靠沟口淤地坝的拦截。

通过对园子沟年降雨侵蚀力与年侵蚀泥沙坝地沉积量做双累积曲线,进一步分析淤地坝建成以来坝控流域内淤积泥沙的变化。从图 5 可以看出,园子沟年降雨侵蚀力与年侵蚀泥沙坝地沉积量存在一个转折点,其位于园子沟淤地坝建坝运行第 7 年(2013 年)左右。为此本文将园子沟淤地坝建设运行划分为 2 个阶段:第 1 阶段(2007—2013 年),新建运行的“闷

葫芦”淤地坝,对原本出沟的侵蚀泥沙全部拦截,打破了原有的能沙关系;第 2 阶段(2013—2016 年),坝地沟道内已淤积大量的侵蚀泥沙,其有效抬高了流域侵蚀基准面,增大了沟道雨洪的过水断面面积,促使挟带的泥沙沿程快速沉降,同时坝地淤积面增高掩埋了流域下部侵蚀较为严重的沟壁等,此时淤地坝坝体直接拦截的泥沙占整个产沙性降雨事件的侵蚀泥沙的比例较前期下降。同时对淤积层环刀采样获取的水分数数据表明,坝地含水量随深度增加波动趋缓,平均含水量 23.8%,这些水分有效促进了坝控流域内植被的生长,进一步减少了侵蚀的发生。所以第 2 阶段减少的侵蚀泥沙或来自于淤地坝修建后对侵蚀基准面抬高以及植被生长良好的减蚀作用。

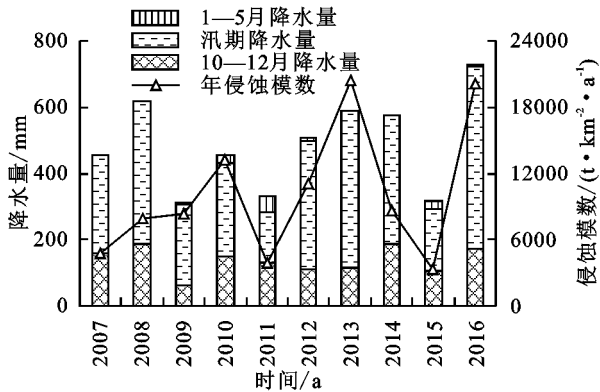


图 4 园子沟 2007—2016 年内降水分布与侵蚀模数关系

### 2.3 沉积泥沙旋回源地泥沙贡献率

处于园子沟沟口的单坝系“闷葫芦”淤地坝有效拦截了坝控流域内不同侵蚀性降雨事件沉积的泥沙。这部分携带着侵蚀部位信息的侵蚀泥沙可反演出淤地坝建成后坝控流域内潜在泥沙源地对坝地沉积泥

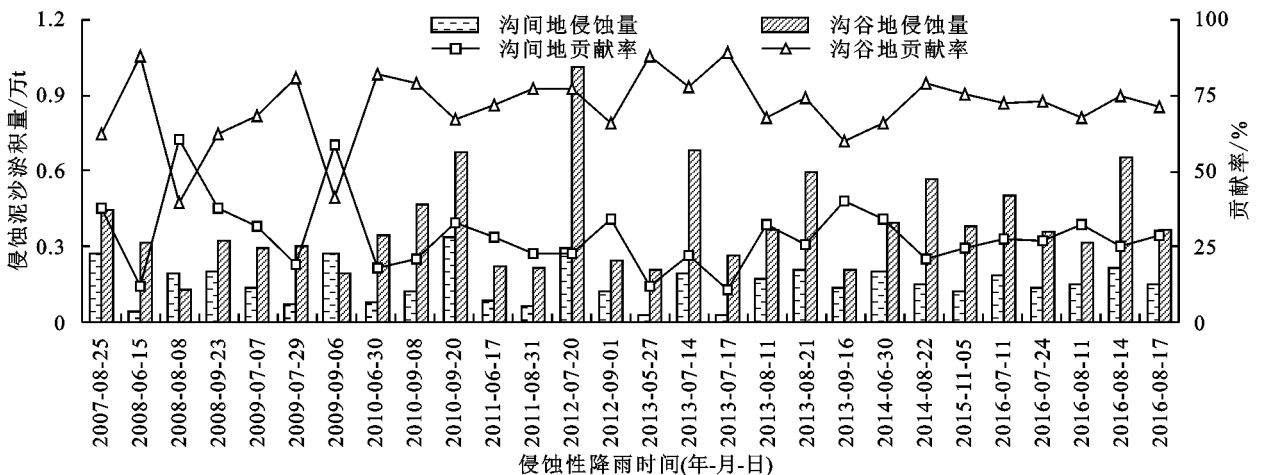


图 6 不同侵蚀性降雨下沟谷地、沟间地泥沙贡献率

在前述断代分析中,本研究发现,研究流域侵蚀性降雨事件对应的日降雨量为 22.8 mm,同时在实际采样中发现,侵蚀泥沙并非随降雨量增加而无限增加。因此本文将各场次侵蚀性降雨事件降雨量从小到大排序并与对应沟间地、沟谷地侵蚀泥沙做双累积曲线。由图 7

可知,沟谷地泥沙贡献率与场次降雨量的双累积曲线结果显示,累积贡献率与累积场次降雨量并非呈直线,这说明流域内存在除水力侵蚀以外的侵蚀营力,结合实际,沟间地上的植被盖度参差不齐,在植被生长较差的地方还受到风力侵蚀,而沟谷地存在重力侵蚀的现象。

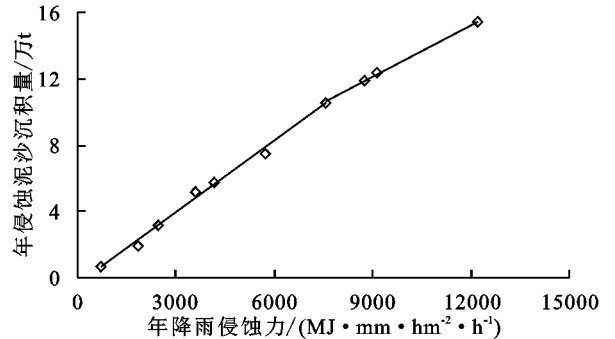


图 5 年降雨侵蚀力与年淤积量的双累积曲线

沙贡献率的变化情况。本文将坝控流域内的坝地沉积泥沙潜在来源地分为 2 大类,即崩边线以上的沟间地、崩边线以下坝地边缘以上的沟谷地。通过复合指纹识别方法,筛选出 d<sub>0.1</sub>、d<sub>0.9</sub> 和 TOC 作为最佳指纹识别因子组合,泥沙来源计算结果(图 6),平均拟合优度 GOF 为 81.7%。

从图 6 可以看出,来自沟谷地的侵蚀泥沙为园子沟坝控流域内坝地沉积泥沙的主要来源,平均占比达 71.4%;沟间地较少,为 28.6%。沟间地、沟谷地泥沙贡献率;在淤地坝建成运行第 1 阶段波动较大,第 2 阶段趋于平缓。来自沟谷地的侵蚀泥沙趋势变化与坝地淤积总量趋势变化基本一致,而来自沟间地的侵蚀泥沙虽有波动,但基本在均值(0.16 万 t)附近摆动,其中在部分降雨量较小的侵蚀性降雨事件中泥沙贡献几乎为 0。总体趋势方面,来自沟间地的侵蚀泥沙稳中略降,而来自沟谷地的侵蚀泥沙随降雨量的增大呈增大的趋势,这说明作为流域内侵蚀泥沙主要来源的沟谷地,因短、深、窄的地形以及大面积裸露的砒砂岩受降雨等影响较大。

在沟间地累积侵蚀量与累积场次降雨量双累积曲线可以发现,在侵蚀性降雨事件降雨量变大的同时,存在一个突变点,即在日降雨量 $>45.4$  mm之后,沟间地侵蚀泥沙随降雨量的增大而增大的趋势变缓,这说明沟间地侵蚀泥沙的多寡并非受日降雨量的唯一影响,沟间地的坡长、坡度等地形因素同样会对侵蚀的加剧起到制约

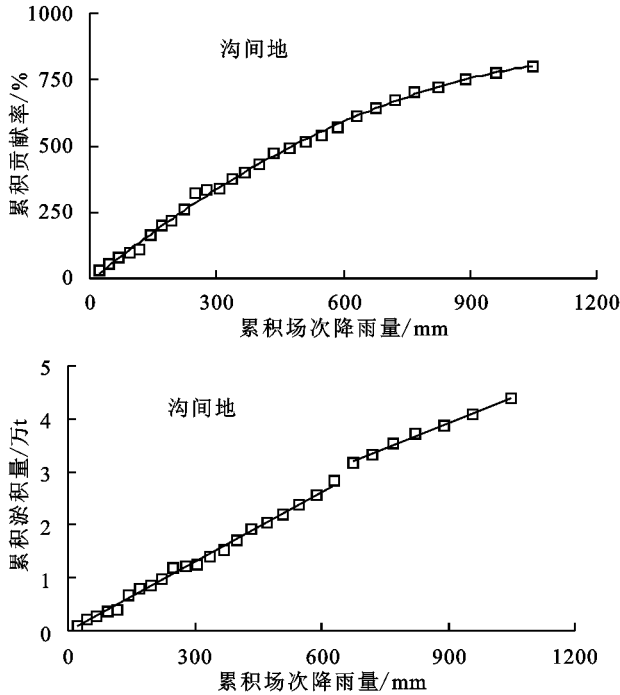


图7 园子沟流域侵蚀泥沙与产沙降雨量的双累积曲线

### 3 结论

(1)坝地沉积泥沙以砂粒为主,粉粒次之,黏粒最少。淤地坝的建设有效拦截了坝控流域内的侵蚀泥沙,特别是 $>0.05$  mm粗泥沙。

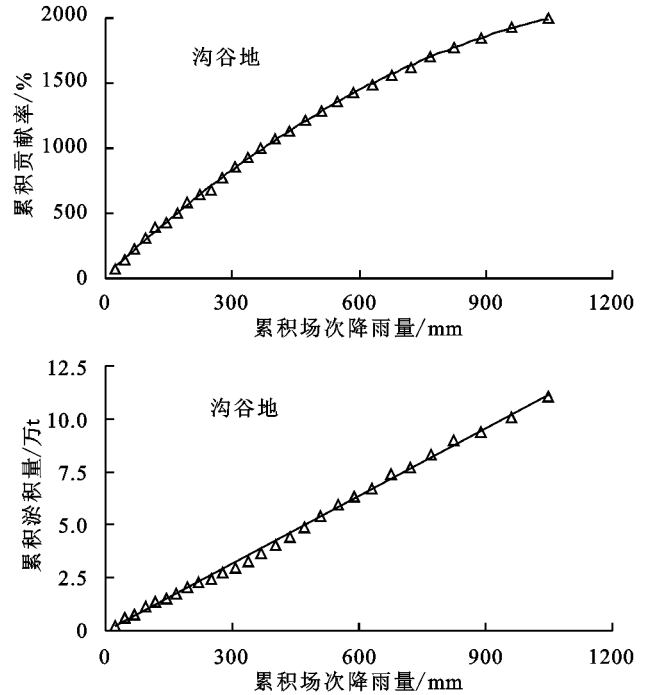
(2)在本研究流域,产沙性降雨事件对应的最小日降雨量为22.8 mm,截至2016年底淤积比为0.44,坡面植被措施降低了侵蚀发生的可能性,延长了淤地坝的使用年限。淤地坝的建成运行可划分为2个阶段,前期主要依靠坝体拦蓄泥沙,后期随着拦蓄泥沙的增多,减蚀作用凸显,同时坝地泥沙对水源的涵养为植被生长提供了条件。

(3)本研究区园子沟坝控流域内侵蚀泥沙的主要来源地为沟谷地,其对坝地沉积泥沙的平均贡献率达到了71.4%;沟间地对坝地沉积泥沙的平均贡献率仅为28.6%。2种侵蚀部位的泥沙贡献率在前期波动较大,后期能沙关系趋缓。沟间地侵蚀泥沙多寡在降雨量增大时并非受植被的单一影响,在日降雨量 $>45.4$  mm时,地形因素也会限制侵蚀的进一步发生。

#### 参考文献:

[1] 何毅.黄河河口镇至潼关区间降雨变化及其水沙效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.  
[2] 水利部黄河水利委员会.黄河水沙变化研究[R].郑州;

的作用。在沟谷地累积侵蚀量与累积场次降雨量双累积曲线中可以发现,沟谷地侵蚀泥沙总体随侵蚀性降雨事件降雨量的增大而增大,在现场采样过程中发现,园子沟流域沟谷地两侧陡直且大面积砢砂岩裸露,存在重力侵蚀的泥沙堆积在沟道的现象,这为沟道雨洪的泥沙搬运创造了条件。



水利部黄河水利委员会,2015:20-21.

[3] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近70年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.  
[4] 李勉,李平,杨二,等.黄土丘陵区淤地坝建设后小流域泥沙拦蓄与输移特征[J].农业工程学报,2017,33(18):80-86.  
[5] 刘晓燕,高云飞,王富贵.黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J].人民黄河,2017,39(4):1-5,10.  
[6] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J].农业工程学报,2003,19(6):302-306.  
[7] 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.  
[8] 冉大川,罗全华,刘斌,等.黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J].水利学报,2004,35(5):7-13.  
[9] 高云飞,郭玉涛,刘晓燕,等.陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J].地理学报,2014,69(1):73-79.  
[10] Tang Q, Wang S, Fu B J, 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.  
[11] Collins A L, Walling D E. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins [J]. Journal of Hydrology,

- 2002, 261(1): 218-244.
- [12] 赵恬茵. 复合指纹识别法研究黄土高原小流域泥沙来源[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [13] 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.
- [14] 李勉, 杨二, 李平, 等. 淤地坝坝系泥沙粒径组成与变化特征研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4): 746-756.
- [15] 张凤宝, 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.
- [16] Zhao T Y, Yang M Y, Walling D E, et al. Using check dam deposits to investigate recent changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 152: 88-98.
- [17] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 917-927.
- [18] Fu B J, Liu Y, 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.
- [19] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
- (上接第 46 页)
- [9] 李建闽, 滕召胜, 吴言, 等. 基于移频滤波的频率测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 762-769.
- [10] Albert B, Francis J N. 小波与傅里叶分析基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [11] 肖毅, 杨胜发, 邵学军. 三峡水库水沙条件时序变化趋势研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(6): 22-27.
- [12] 戴会超, 王玲玲, 蒋定国. 三峡水库蓄水前后长江上游近期水沙变化趋势[J]. 水利学报, 2007(增刊 1): 226-231.
- [13] 孙鹏, 张强, 白云岗, 等. 基于马尔科夫模型的新疆水文气象干旱研究[J]. 地理研究, 2014, 33(9): 1647-1657.
- [14] 孙鹏, 张强, 涂新军, 等. 基于马尔科夫模型的鄱阳湖流域水文气象干旱研究[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1177-1186.
- [15] Xu J X. Decreasing trend of sediment transfer function of the Upper Yellow River, China, in response to human activity and climate change [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(2): 311-325.
- [16] 蔡明科. 关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 33-37.
- [17] 侯素珍, 王平, 楚卫斌. 黄河上游水沙变化及成因分析[J]. 泥沙研究, 2012(4): 46-52.
- [18] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1641-1649.
- [20] 田鹏, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于改进 RUSLE 模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 832-840.
- [21] 李景宗, 张永永, 赵帮元, 等. 皇甫川特拉沟小流域近期泥沙减少成因分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 1-4.
- [22] 惠波, 李鹏, 张维, 等. 王茂沟流域淤地坝系土壤颗粒与有机碳分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 1-5.
- [23] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [24] 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: 343-352.
- [25] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 13(7): 955-975.
- [26] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia [J]. *Water Resource Research*, 2003, 39(3): 53-62.
- [27] 冉大川, 左仲国, 上官周平. 黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦减粗泥沙分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 443-450.
- [28] 高海东. 黄土高原丘陵沟壑区沟道治理工程的生态水文效应研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2013.
- [19] 田世民, 郭建英, 尚红霞, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄量研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 65-70.
- [20] 田世民, 姚文艺, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄影响因子变化特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1701-1707.
- [21] 李晓宇, 刘晓燕, 李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1253-1268.
- [22] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域上游降水时空结构特征[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 27-33.
- [23] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354.
- [24] Shi C X, Dian Z, You L Y. Changes in sediment yield of the Yellow River basin of China during the Holocene [J]. *Geomorphology*, 2002, 46(3): 267-283.
- [25] 朱吉生, 李纪人, 黄诗峰, 等. 近 30 年十大孔兑流域植被覆盖度空间变化的遥感调查与分析[J]. 中国水土保持, 2015(7): 68-70.
- [26] 刘通, 黄河清, 邵明安, 等. 气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 17-22.