

# 砭砂岩区小流域场次洪水产流产沙特征

谢梦瑶<sup>1</sup>, 任宗萍<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 马勇勇<sup>1</sup>, 蒋凯鑫<sup>1</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)

**摘 要:**我国砭砂岩区属于多营力复合侵蚀区,其中水力侵蚀是各侵蚀物质输移的主要载体。选取位于裸露砭砂岩剧烈侵蚀区的二老虎沟小流域为研究区探讨砭砂岩区小流域场次洪水产流产沙特征,细化区域水蚀过程。2018 年 8 月采集了小流域两层泥沙沉积旋回样及对应的侵蚀物质来源,结合泥沙沉积旋回样对应的降水、径流、泥沙数据进行了分析。以洪峰所在时间将两次洪水事件命名为 20180716(1 号)和 20180719(2 号)。结果表明:流域雨前土壤含水量及雨型差异是决定流域产流开始时间和初损量的主因。1 号洪水径流量、输沙量分别为 2 号洪水对应的该值的 2.7 倍及 3.4 倍。粉粒、中砂粒、细砂粒为二老虎沟小流域坝地沉积旋回样的主要粒径,占比达 70%。两场洪峰条件下小流域泥沙淤积状况存在差异,与 1 号洪水的沉积旋回样相比,2 号洪水的沉积旋回样粒径粗化。黏粒、粉粒、极细砂粒占比减少,细砂粒、中砂粒、粗砂粒的含量增加。利用 Weibull 分布拟合了二老虎坝地泥沙沉积旋回主要物质来源(地表覆土及裸露砭砂岩)的理论分布曲线,在此基础上根据最小二乘准采用差分进化算法求得沉积旋回层的物质来源比例,结果显示砭砂岩为两场洪水沉积旋回层中的主要侵蚀运移物质。

**关键词:**场次洪水; 产流产沙; 沉积旋回; 粒径分布; Weibull 分布

**中图分类号:**P333

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)05-0045-05

## Characteristics of Runoff and Sediment Yield During Flood Events in a Small Watershed of the Pisha Sandstone Area

XIE Mengyao<sup>1</sup>, REN Zongping<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, MA Yongyong<sup>1</sup>, JIANG Kaixin<sup>1</sup>

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

Technology, Xi'an 710048, China; 2 Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological

Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The Pisha Sandstone area in China is an erosion zone affected by multiple forces, with water erosion being the main erosion force as well as the transport carrier of erosion materials. In order to better understand the processes pertaining to regional water erosion in a region of intense erosion made of Pisha sandstone and frequently affected by floods, an analysis of the characteristics of the runoff and sediment yield in the Erlaohugou watershed was conducted during flood events in this study. In August 2018, we carried out sampling of erosion materials and two sedimentary cycles in the region. The precipitation, runoff and sediment data corresponding to sedimentary cycles were analyzed. Hereafter, the flood which the flood peak the 20180716 was chosen as the reference as NO.1, and the flood which the flood peak 20180719 was chosen as NO.2. The initial soil water content and the pattern of rainfalls are the two main factors that determine the starting time and the initial loss of the runoff. The runoff and sediment transport of NO.1 are 2.7 times and 3.4 times of the value corresponding to NO.2, respectively. The types of dominant sediment in the sedimentary cycles are medium sand, fine sand and silt, accounting for 70%. The siltation in the basin changed depending on changes of the flood conditions. Compared with the sedimentary cycle of NO.1, the particle size of the sedimentary cycle of flood NO.2 is coarsened. The proportion of clay, silt and extremely fine sand decreased, while the content of fine sand, medium sand and coarse sand increased. This study also considered

收稿日期:2019-06-10

修回日期:2019-11-26

资助项目:国家重点研发计划(2017YFC0504501);国家自然科学基金(51879281,51779204)

第一作者:谢梦瑶(1996—),女,陕西三原人,硕士研究生,主要从事流域水沙演变研究.E-mail:xiemengyao000@163.com

通信作者:任宗萍(1982—),女,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事流域水沙过程研究.E-mail:renzongping@163.com

the use of the Weibull distribution to establish theoretical distribution curve of the particle size distribution of the erosion materials (surface soil and bare Pisha Sandstone) in the Erlaohugou watershed. On the basis of this, the proportion of erosion materials in the sedimentary cycles is obtained by differential evolution according to the least square criterion, and it is found that Pisha Sandstones are the main erosion materials in the sedimentary cycles.

**Keywords:** Flood events; runoff and sediment yield; sedimentary cycle; grain size distribution; Weibull distribution

我国砒砂岩主要分布在黄河流域的晋陕蒙接壤地区,东至黄河,西达杭锦旗境内的毛布拉克,从西北向东南沿毛乌素沙地西北缘分布,南抵陕西省神木县城,北到库布齐沙漠南缘,总面积  $1.67 \text{ 万 km}^2$  [1-2]。该区成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低 [3-4]。受风力、水力、冻融作用,区域侵蚀剧烈,为黄河粗泥沙的集中来源区,许炯心 [5] 研究了“十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系,结果表明十大孔兑流域上游为薄层黄土覆盖的“砒砂岩”、中下游为风成沙。这种地表物质组成物质分布的配合,使得这一地区的风水两相作用最为典型,并在侵蚀产沙中起到主导作用,成为黄河治理的重点脆弱生态区 [6]。淤地坝建设和植被恢复是该区主要的生态治理措施,使得该区水沙情势也发生了变化;对该区主要流域乌兰木伦河流域和皇甫川流域径流泥沙影响因素分析得到,20 世纪 50 年代以来水土保持措施的实施是流域水沙变化的驱动因素 [7-8];同时对不同植被覆盖类型的砒砂岩自然边坡坡面侵蚀的减流减沙效益研究表明 [9] 植被覆盖可明显增加砒砂岩自然边坡水流冲刷的稳定性。进而对沙棘柔性坝的研究发现,沙棘能够增加影响土壤含水量,拦沙固沙作用导致沟床产生了泥沙筛分效应 [10-11];由于砒砂岩区位于我国干旱半干旱区,雨热同期,汛期,暴雨形成的场次洪水携带高含沙水流,是侵蚀物质运移的主要载体,对黄河输沙量具有重要影响。因此,在生态条件发生改变的情况下,流域泥沙显著减少的趋势下,次

洪过程特征以及侵蚀粒径分布对次暴雨的响应特征是该区进一步治理的依据。

因此,本研究选取位于裸露砒砂岩剧烈侵蚀区的二老虎沟小流域为研究区,细化典型流域场次洪水的降水径流关系、产流产沙特征、流域地表覆土及裸露砒砂岩(源)和坝地泥沙(汇)的粒径分布,探讨砒砂岩区小流域场次洪水的产流产沙特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

二老虎沟小流域位于  $39^{\circ}46'—39^{\circ}48'N, 110^{\circ}35'—111^{\circ}38'E$ ,是黄河位于晋陕峡谷北部的四级支流,发源于内蒙古准格尔旗,流域面积  $3.23 \text{ km}^2$  (图 1) [12]。流域位于温带大陆性气候带,降水多集中于 6—9 月。该区多年平均降水量为  $400 \text{ mm}$ ,多年平均温度为  $7.3^{\circ}\text{C}$ ,多年平均蒸发量为  $2\,000 \text{ mm}$ 。小流域属裸露砒砂岩剧烈侵蚀区,主要土壤为砂岩及泥岩土,沟坡基岩裸露,成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低,梁峁坡零星分布有黄土和栗钙土 [13]。流域以水力侵蚀为主,同时存在着强烈的重力侵蚀和冻融侵蚀。各种侵蚀营力在空间、时间上交替进行,形成该区复杂的土壤侵蚀特征,流域汛期暴雨形成的高含沙水流,是泥沙运移的主要动力。一、二支沟沟口分别建有砒砂岩改性淤地坝、卡口站一座(图 1),各控制面积  $0.2 \text{ km}^2, 0.1 \text{ km}^2$ 。

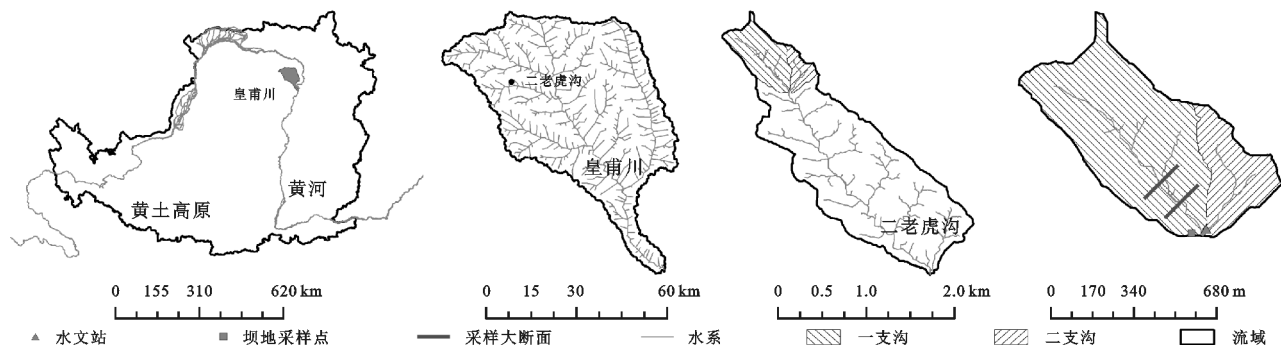


图 1 研究区概况

### 1.2 土壤及河道沉积物粒径数据

2018 年 8 月对二老虎小流域进行坡沟系统及河道淤积层采样,选取 2 个有代表性的大断面采集小流

域坡沟系统数据,该区主要的侵蚀运移物质包含地表覆土及裸露砒砂岩,该系统土壤粒径代表流域易流失区的本底值,表层  $5 \text{ cm}$  深的土样使用环刀取样,由于

流域特殊的地质构造,沟坡原岩使用榔头取样,其中表土采样共计31个,原岩采样共计4个;根据Stokes定理将粗细交替的淤积判定为1层沉积旋回,在淤地坝近坝地处采集两层泥沙沉积旋回,作为两场次洪条件下流域的泥沙淤积状况。在剔除样品明显杂质、风干、人工磨细分散过2 mm筛后,对样品进行上机前期处理,使用Mastersizer 2000对样品粒度进行测定,得到二老虎沟小流域泥沙的粒径源汇数据。

### 1.3 水文气象数据

与沉积旋回样对应的降水、径流、泥沙数据摘自二老虎站2018年的实测径流泥沙过程表和降水过程摘录表。洪量采用下式计算<sup>[14]</sup>:

$$W = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt}{10^4} \quad (1)$$

式中: $W$ 表示洪量(万 $\text{m}^3$ ); $t_1$ 表示时段初(s); $t_2$ 表示时段末(s); $Q(t)$ 表示 $t$ 时刻的流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

次洪输沙量采用积分法计算<sup>[14]</sup>:

$$S = \frac{\sum \left( q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{3} \right) (\Delta t)^3}{10^7} \quad (2)$$

式中: $S$ 表示输沙量(万t); $q_1$ 表示时段初流量( $\text{m}^3$ ); $C_{s1}$ 表示时段初含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $\Delta t$ 表示时段间隔(s); $k_2$ 表示含沙量变化率 $[\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$ ;  $k_1$ 表示流量变化率( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )。

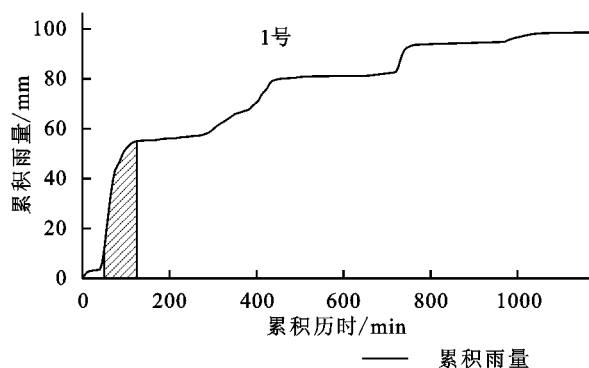


图2 二老虎沟小流域产流降水的累积降水过程

以产流结束时间( $t_R$ )为切点,分析降水开始时刻( $t_0$ )至 $t_R$ 时段内小流域的降水径流关系(图3)。将产流前降水定义为流域产流初损量,该段降水量用于流域初期下渗、植物截留、填洼、蒸散发等耗散过程。据计算,1号洪水初损量为6.0 mm,2号洪水初损量为2.6 mm,2场降水初损持续时间分别为50 min和5 min。这种差异的形成一方面与流域雨前土壤含水量相关,另一方面与降水雨型相关。产生1号洪水的次降水在产流结束后仍持续了43 h,该段降水对土壤含水量有一定的补给,该降水结束后两天,第二场

### 1.4 数据处理

选用Weibull分布对单峰泥沙粒度分布(源)进行拟合,分析研究区沉积旋回样的物质来源特征。两参数的Weibull分布函数<sup>[15]</sup>表达式如下:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

式中: $F(x)$ 表示分布函数; $x$ 表示粒径; $\eta$ 表示比例系数; $\beta$ 表示形状系数。

河道淤积层作为小流域泥沙的汇,认为其由不同的源按比例组合,即源汇关系符合:

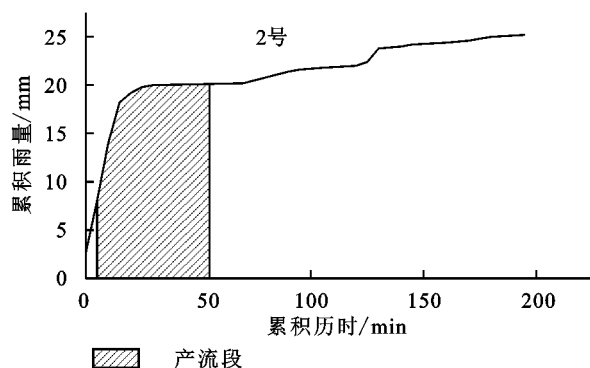
$$f(x) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 表示理论级配曲线函数; $f_1(x)$ 表示物质来源1的理论级配曲线函数; $f_2(x)$ 表示物质来源2的理论级配曲线函数; $a_1$ 表示比例系数; $a_2$ 表示比例系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水径流过程

对沉积旋回样对应的二老虎沟小流域洪水事件进行分析,以洪峰所在时间将两次洪水事件命名为20180716(1号)和20180719(2号)。洪水事件对应的累积降水显示,尽管该区降水持续时间长,但产流段与降水历时仅存在部分重叠,1号洪水产流时间占降水历时的6.44%,2号洪水产流时间占降水历时的25.64%(图2)。



产流降水开始,2号洪水实测流域雨前土壤含水量与1号洪水相比增加7.6%,初损量相对减少;此外该区产流方式属于超渗产流,即雨强大于下渗强度时,产生地面径流,2号洪水对应的降水主峰与1号洪水对应的降水峰值相比偏前(图3),产流降水的相关参数(表1)显示,1号洪水对应的降水在次降水量、最大30 min雨强、降雨侵蚀力上大于2号洪水对应的降水,但由于降水历时过长,该场降水的平均雨强小于2号洪水对应的降水,雨型差异导致2号洪水初损持续时间短于1号洪水,流域产流提前。

2.2 径流输沙特征

二老虎沟沉积旋回样对应的场次洪水径流泥沙过程(图 3)显示,场次洪水的径流泥沙过程为单峰过

程,峰现时间一致,流域场次洪水的径流泥沙过程在时间上具有协同性。

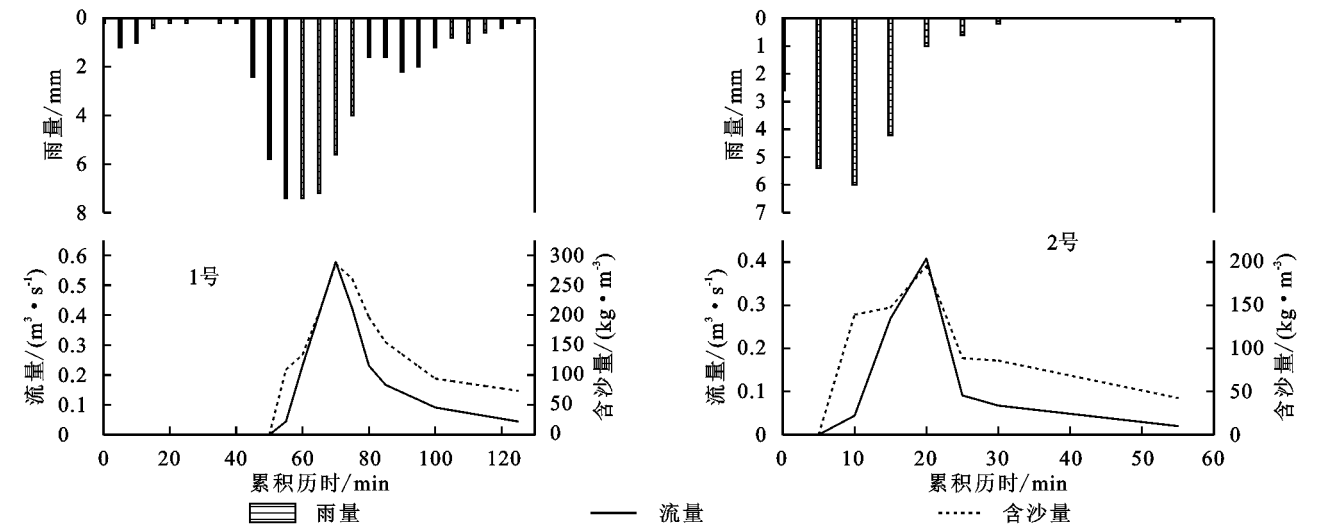


图 3 二老虎沟小流域降水—径流—泥沙关系

表 1 二老虎沟小流域产流降水参数

径流次序	降水	次降	平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	<i>I</i> <sub>30</sub> / (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
	历时/min	水量/mm			
20180716(1 号)	1165	98.6	5.1	74.8	1718.7
20180719(2 号)	195	25.2	7.8	34.8	195.7

1 号洪水的洪峰流量为 0.65 m<sup>3</sup>/s,洪水历时为 75 min,最大含沙量为 318.9 kg/m<sup>3</sup>; 2 号洪水的洪峰流量为 0.408 m<sup>3</sup>/s,洪水历时为 50 min,最大含沙量为 195.3 kg/m<sup>3</sup>。径流作为小流域泥沙运移的主要载体,影响流域输沙过程,根据两场洪水的流量过程线和含沙量过程线推求了两次洪水的径流量和输沙量,计算结果显示 1 号洪水为主要产流产沙洪水,该场洪水对应的径流量为 826.1 m<sup>3</sup>,输沙量为 2.7 t; 2 号洪水产生的径流量为 308.9 m<sup>3</sup>,输沙量为 0.8 t。

2.3 泥沙源汇粒径分布

二老虎沟小流域的坝地沉积旋回样的粒径分布

显示,两场次洪条件下小流域泥沙淤积状况存在差异,沉积旋回粒径分级参照美国制土壤分级标准,分级结果(表 2)显示,二老虎沟小流域 1,2 号洪水对应的沉积旋回层的主要粒径为粉粒、中砂粒、细砂粒,上述 3 种粒径占比达 70%。

不同场次对应的粒径分布存在差异,2 号洪水对应的沉积旋回层的黏粒、粉粒、极细砂粒占比与 1 号洪水相比分别减少 2.4%,9.5%,2.9%,与此同时细砂粒、中砂粒、粗砂粒的含量增加 3.4%,8%,3.3%。2 号洪水的沉积旋回样与 1 号洪水的沉积旋回样相比粒径粗化。

表 2 二老虎沟小流域坝地泥沙沉积旋回颗粒分级

沉积旋回事件	颗粒分级						
	黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒
20180716(1 号)	7.4%	29.1%	11.8%	18.7%	23.5%	9.4%	0.0%
20180719(2 号)	5.0%	19.6%	8.9%	22.1%	31.6%	12.7%	0.0%

二老虎沟小流域主要的侵蚀运移物质包含地表覆土及裸露砒砂岩,为探究坝地泥沙沉积旋回物质来源,使用 Weibull 分布对二老虎沟小流域的地表覆土及裸露砒砂岩的粒径分布曲线进行拟合,粒径经验分布曲线采用各实测曲线均值,根据最小二乘准采用差分进化算法求得 Weibull 分布的最优参数,在此基础上拟合了二老虎坝地泥沙沉积旋回物质来源的理论分布曲线(图 4)。拟合结果显示实际分布与理论分

布的均方误差(MSE)均小于 0.000 5,实际分布与理论分布的皮尔逊相关系数均大于 0.99,显著性检验结果  $p<0.01$ ,实际分布与理论分布显著相关。裸露砒砂岩粒径数据的理论分布曲线形状系数  $\beta$  值为 1.29,比例系数  $\eta$  均值为 280.02;地表覆土粒径数据的理论分布曲线形状系数  $\beta$  值为 0.95,比例系数  $\eta$  均值为 118.48。

河道淤积层作为小流域泥沙的汇,认为其由不同的源按比例组合,以次洪条件下河道淤积层的颗粒区



间分布函数作为待拟合函数,使用小流域地表覆土及裸露砒砂岩对应的理论区间分布函数进行线性拟合,根据最小二乘准采用差分进化算法求得沉积旋回层的物质来源比例(图 5)。计算结果显示,1 号洪水与

2 号洪水的沉积旋回样中侵蚀运移物质占比最高的为砒砂岩,但 1 号洪水与 2 号洪水的沉积旋回样的侵蚀运移物质的占比存在差异,与 1 号洪水相比,2 号洪水的砒砂岩占比增长 40.6%(表 3)。

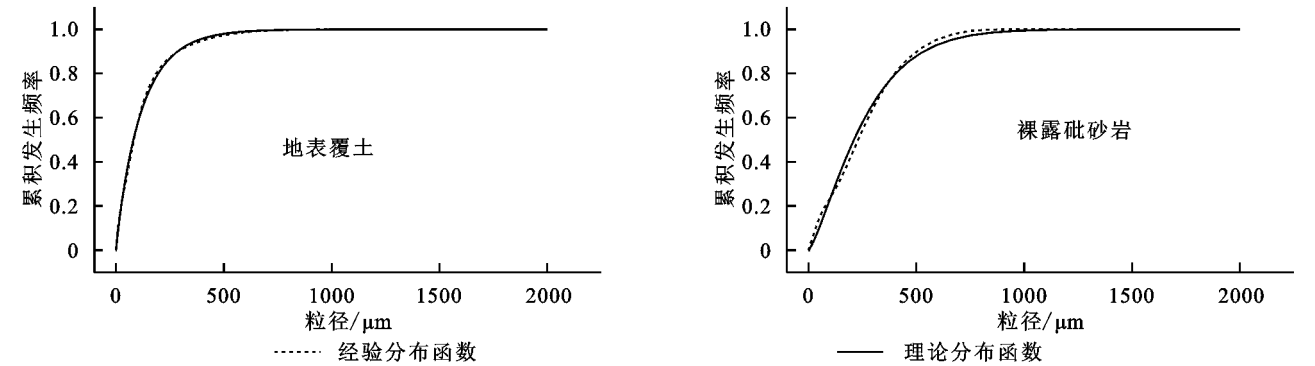


图 4 二老虎沟小流域主要的侵蚀运移物质颗粒分布函数拟合

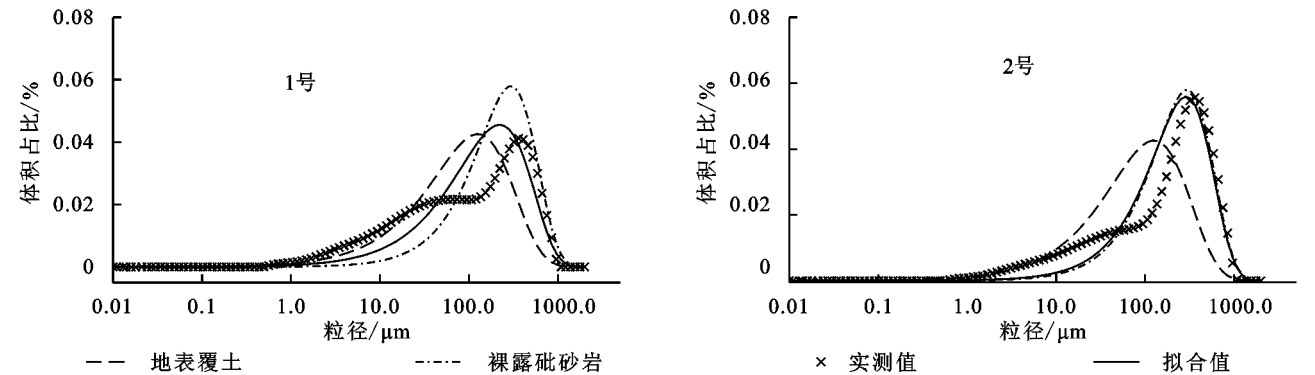


图 5 坝地泥沙沉积旋回粒径区间占比拟合

表 3 二老虎沟小流域沉积旋回层的物质来源比例			
沉积旋回事件	$a_1/\%$	$a_2/\%$	MSE
20180716(1 号)	47.6	52.4	3.7 E-05
20180719(2 号)	7.0	93.0	2.8 E-05

注: $a_1$ 表示地表覆土对应的比例系数; $a_2$ 表示裸露砒砂岩对应的比例系数。

3 结论

降水作为二老虎沟小流域洪水事件的主要驱动力,为流域产流产沙提供了初始动力来源,选用次降水量、最大 30 min 雨强、降雨侵蚀力、平均雨强量化流域产流降水过程。分析结果表明 1 号洪水对应的次降水量、最大 30 min 雨强、降雨侵蚀力上大于 2 号洪水对应的降水过程值,但由于降水历时过长,该场降水的平均雨强小于 2 号洪水对应的降水。2 号洪水实测流域雨前土壤含水量与 1 号洪水相比增加 7.6%,初损量相对减少,流域雨前土壤含水量及雨型差异是决定流域产流开始时间和初损量的主因。径流作为小流域泥沙运移的主要载体,对流域输沙过程具有影响,1 号洪水径流量、输沙量分别为 2 号洪水对应的该值的 2.7 倍及 3.4 倍。

二老虎沟小流域的坝地沉积旋回样的分析结果显示,粉粒、中砂粒、细砂粒为二老虎沟小流域坝地沉积旋回样的主要粒径,占比达 70%。两场次洪条件下小流域泥沙淤积状况存在差异,与 1 号洪水的沉积旋回样相比,2 号洪水的沉积旋回样粒径粗化。二老虎沟小流域主要的侵蚀运移物质包含地表覆土及裸露砒砂岩,分析结果显示砒砂岩为 1 号洪水与 2 号洪水的沉积旋回样中的主要侵蚀运移物质,但与 1 号洪水相比,2 号洪水沉积旋回样中的砒砂岩占比增长,地表覆土占比减少。

参考文献:

[1] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.

[2] Yang F S, Cao M M, Li H E, et al. Simulation of sediment retention effects of the single seabuckthorn flexible dam in the Pisha Sandstone area[J]. Ecological Engineering, 2013,52:228-237.

[3] Zhen Q, Zheng J, He H, et al. Effects of Pisha sandstone content on solute transport in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2016,144:2214-2220.

- sand dune fixation with straw checkerboard technology and its effects on the environment[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(3): 449-464.
- [14] Qu J, Zu R, Zhang K, et al. Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers[J]. *Geomorphology*, 2007, 88(1/2): 193-200.
- [15] Yang D, Liu W, Wang J, et al. Wind erosion forces and wind direction distribution for assessing the efficiency of shelterbelts in northern China[J]. *Aeolian Research*, 2018, 33: 44-52.
- [16] 陈超, 周广胜. 1961—2010 年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 91-103.
- [17] 张奎壁, 邹受益. 治沙原理与技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [18] Walkley A, Black I A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method[J]. *Soil Science*, 1934, 37: 29-38.
- [19] Olsen S R, Sommers L E. Methods of soil analysis, Part 2 Chemical and microbiological properties [M]. Madison, Wisconsin USA: Soil Science Society of America, 1982.
- [20] Jackson M I. Soil chemical analysis[M]. New Delhi: Prentice Hall of India, 1973.
- [21] Veihmeyer F, Hendrickson A. Irrigation: During a rainfall-deficient year[J]. *California Agriculture*, 1948, 2(3): 3-16.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [23] Zhang C, Xue S, Liu, et al. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1): 163-178.
- [24] Askari M S, Holden N M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 57-67.
- [25] Seker C, Ozyaytekin H H, Negis H, et al. Identification of regional soil quality factors and indicators: A case study on an alluvial plain (central Turkey) [J]. *Solid Earth*, 2017, 8(3): 583-595.
- [26] 陈志超, 李宁, 刘昌华. 古尔班通古特沙漠草方格沙障对土壤养分的影响[J]. *草业科学*, 2013, 30(5): 699-702.
- [27] 丁爱强, 谢怀慈, 徐先英, 等. 3 种不同机械沙障设置后期对沙丘植被和土壤粒度与水分的影响[J]. *中国水土保持*, 2018, 434(5): 59-63.
- [28] 马全林, 王继和, 刘虎俊, 等. 机械沙障在退化人工梭梭林恢复中的应用[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(4): 526-531.
- [29] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 不同年限的草方格沙障对生态恢复的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(5): 10-15.
- [30] 李敏岚, 屈建军, 唐希明, 等. 高密度聚乙烯 (HDPE) 蜂巢式沙障对土壤水分的影响[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 136-144.
- [31] 王睿, 周立华, 陈勇, 等. 库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 330-336.
- [32] 牛存洋, 阿拉木萨, 宗芹, 等. 科尔沁沙地流动沙丘塑料防沙网防风固沙效果试验[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 12-22.

~~~~~

(上接第 49 页)

- [4] Yang F S, Bi C F, Cao M M, et al. Simulation of sediment retention effects of the double seabuckthorn plant flexible dams in the Pisha Sandstone area of China[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 21-31.
- [5] 许炯心. “十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J]. *泥沙研究*, 2013(6): 28-37.
- [6] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018, 40(6): 1-7.
- [7] 任宗萍, 谢梦瑶, 马勇勇, 等. 乌兰木伦河 1960—2015 年水沙周期性分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 78-82, 97.
- [8] 慕星, 张晓明. 皇甫川流域水沙变化及驱动因素分析[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(5): 933-939.
- [9] 苏涛, 张兴昌, 王仁君, 等. 植被覆盖对砒砂岩地区边坡侵蚀的减流减沙效益[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 98-101.
- [10] 杨方社, 曹明明, 李怀恩, 等. 沙棘柔性坝影响下砒砂岩沟道土壤水分空间变异分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(7): 161-167.
- [11] 谢毅文, 李怀恩, 李越, 等. 砒砂岩区植物拦沙作用导致泥沙筛分效应研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 22-25.
- [12] 张传才, 秦奋, 汪永新, 等. 流域地貌形态多尺度三维形量化及尺度效应: 以砒砂岩区二老虎沟为例[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 278-283.
- [13] 张传才, 秦奋, 张喜旺, 等. 水沙物理模型 CASC2D-SED 的 DEM 尺度效应发生机制[J]. *水文*, 2018, 38(2): 15-24.
- [14] 谢悦波. 水信息技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [15] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 基于 Weibull 模型的细粒尾矿粒径分布[J]. *重庆大学学报*, 2016, 39(3): 1-12.