

“23·7”京津冀暴雨洪水特性分析

—以河北省临城县为例

李天毅^{1,2}, 戴宁¹, 丛佩娟¹, 陈恒昌³, 贾继宏³, 李扬³, 贵欣瑞³

(1.水利部水土保持监测中心, 北京 100053; 2.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, 陕西 西安 710048; 3.河北省临城县水务局, 河北 临城 054399)

摘要: [目的] 开展场次暴雨洪水过程及水土保持调查工作, 分析小流域的暴雨洪水过程以及暴雨所造成的土壤侵蚀状况, 为水土保持决策提供科学支撑。[方法] 采用野外调查的方法对皇迷东沟和梁家庄西沟开展洪痕测量调查并计算洪峰流量模数, 分析暴雨洪水对小流域造成的侵蚀危害。[结果] ①本次降雨持续时间长、雨强大, 梁家庄西沟和皇迷东沟流域累计雨量分别达到 1 008.5 和 613.6 mm。②调查按洪痕法调查推算了洪峰流量, 皇迷东沟、梁家庄西沟小流域洪峰流量模数为 10.80 和 36.07 m³/(s·km²)。坡度和水土保持措施是影响洪峰流量的主要因素, 较大的坡度会使洪峰流量变大, 而完善的水土保持措施可以起到有效的削峰作用。③调查小流域位于泇河流域上游, 是本次暴雨中心和洪水的主要产流区, 小流域洪峰流量模数大于下游水文站洪峰流量模数。④梁家庄西沟的侵蚀情况比皇迷东沟严重, 主要原因是皇迷东沟的果园、梯田和谷坊的面积占比大于梁家庄西沟, 皇迷东沟的平均坡度小于梁家庄西沟且梁家庄雨量站的降雨量峰值持续时间更长。[结论] 实施水土保持措施是必要且有效的, 而且要进一步完善梯田、台地谷坊的建设, 良好的水土保持措施可以有效减少洪峰流量以及侵蚀现象的发生。

关键词: 极端暴雨; 暴雨调查; 洪峰流量模数; 土地利用类型; 水土保持措施

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0155-12

中图分类号: S157.1

文献参数: 李天毅, 戴宁, 丛佩娟, 等.“23·7”京津冀暴雨洪水特性分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 155-166. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.017; Li Tianyi, Daining, Cong Peijuan, et al. Analysis of rainstorm flood characteristics in “23·7” Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 155-166.

Analysis of Rainstorm Flood Characteristics in

“23·7” Beijing-Tianjin-Hebei

—A Case Study of Lincheng County, Hebei Province

Li Tianyi^{1,2}, Dai Ning¹, Cong Peijuan¹, Chen Hengchang³, Jia Jihong³, Li Yang³, Gui Xinrui³

(1. Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of

Water Resources, Beijing 100053, China; 2. State Key Laboratory of

Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an,

Shaanxi 710048, China; 3. Water Bureau of Lincheng County, Hebei Province, Lincheng, Hebei 054399, China)

Abstract: [Objective] Investigations on rainstorm and flood processes and water and soil conservation were carried out, rainstorm and flood processes in small basins and soil erosion caused by rainstorm were analyzed, in order to provide scientific support for water and soil conservation decision-making. [Methods] Field survey methods were used in which flood marks were measured and investigated in the Huangmi east ditch and the Liangjiazhuang west ditch. The flood peak discharge modulus was calculated to analyze the erosion damage caused by rainstorm floods to small watersheds. [Results] ① The rainfall lasted for a long time and was strong. The cumulative rainfall in the Liangjiazhuang west ditch valley and the Huangmi east ditch valley reached 1 008.5 mm and 613.6 mm, respectively. ② According to the flood mark survey, the

收稿日期: 2023-10-20

修回日期: 2024-02-21

资助项目: 国家自然科学基金黄河水科学联合基金项目“黄土高原极端暴雨土壤侵蚀致灾及蓄排协调防控机制”(U2243213); 国家重点研发计划黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀协同治理技术与示范项目“黄土高原风水复合侵蚀生态治理技术识别挖掘和配置模式研究”(2022YFF130080402), “多沙粗沙区水土流失生态治理技术全生命周期抑沙阻沙效益分析”(2022YFF130080403)

第一作者: 李天毅(1996—), 男(汉族), 山东省临邑县人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源, 水土保持。Email: lty617148964@163.com。

通信作者: 戴宁(1981—), 女(汉族), 吉林省长春市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持技术管理工作。Email: daining@mwr.gov.cn。

peak discharge modulus of the Huangmi east ditch and the Liangjiazhuang west ditch watersheds were $10.80 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ and $36.07 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, respectively. Slope and soil and water conservation measures were the main factors affecting flood peak discharge. Larger slopes will increase flood peak discharge, and soil and water conservation measures can play an effective role in peak reduction. ③ The investigated small watersheds were located in the upper reaches of the river basin, which is the main runoff producing area of the rainstorm center and flood. The peak flood discharge modulus of the small watersheds was larger than that of the downstream hydrology station. ④ The erosion situation of the Liangjiazhuang west ditch was more serious than that of the Huangmi east ditch, mainly due to the following reasons: the area proportion of orchards, terraces, and check dams in the Huangmi east ditch was larger than that of the Huangmi west ditch; the average slope of the Huangmi east ditch was smaller than that of the Liangjiazhuang west ditch; and the peak duration of rainfall at the Liangjiazhuang rain-measuring station was longer. [Conclusion] The implementation of water and soil conservation measures is necessary and effective, and the construction of terraces and terrace valleys must be further improved. Optimized soil and water conservation measures can effectively reduce the occurrence of flood peak discharge and erosion phenomenon.

Keywords: extreme rainfall; storm survey; peak discharge modulus; land use type; soil and water conservation measures

近几十年来,全球气候变化的影响导致极端降雨事件频繁发生,引发了严重的洪水灾害^[1]。这给水土保持工作带来了新的挑战。水土流失的影响因素包括降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖、地形和水土保持措施等^[2]。在这些相关因素中,降雨被认为是土壤侵蚀的主要气象驱动力^[3]。极端降雨是导致土壤侵蚀的因素之一,降雨量与降雨侵蚀力之间存在显著的正相关关系。降雨侵蚀力反映了降雨对土壤侵蚀的潜在能力^[4]。较高的降雨量将导致降雨侵蚀力增加,进而加剧土壤侵蚀,对当地水土流失造成极大的影响^[5],因此,强降雨会对土壤侵蚀产生较大的影响。

洪水是暴雨、冰雪急剧融化等自然因素或水库垮坝等人为因素引起的江河湖库水量迅速增加或水位急剧上涨,对人民生命财产造成危害的现象^[6]。近年来,我国极端降水量对总降水量的贡献率呈增加趋势,且季节差异明显,极端天气频发^[7]。暴雨持续时间越长越容易导致灾害发生,最直观的就是洪水泛滥,甚至还会引起泥石流、山崩和滑坡等次生灾害的发生^[8],山洪的爆发也会导致江河横溢、水库垮坝、农田淹没、房屋冲塌及交通电讯的中断,甚至还可能造成重大人员伤亡^[9]。水土保持措施通过改变下垫面条件,从而导致洪水洪峰和洪量减小^[10],有研究^[11-14]表明,水土保持工程对洪峰和洪量均有减小作用,且洪峰和洪量的减小程度随洪水量级的增加而减小,海河流域通过造林、种草、封山育林等措施来逐步治理流域内的水土流失,使得流域内的森林、草地的覆盖率提高了 20%~40%,洪水次数、洪峰量级均有不同程度的减少或降低。因此,目前亟需开展场次暴雨水土保持调查工作,为下一步水土保持决策提供科学支撑。

水利部已组织开展了 4 次较大规模的场次暴雨

水土保持调查,分别针对 2017 年黄河无定河流域“7·26”特大暴雨、2019 年山东省临朐县“8·10”特大暴雨、2021 年河南省“7·20”特大暴雨和 2022 年“7·15”黄河中游特大暴雨开展^[15]。2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日,受台风“杜苏芮”影响,京津冀地区出现极端强降雨过程,16 个国家气象观测站日降雨量突破历史极值,海河发生了流域性大洪水。7 月 29 日以来,华北、黄淮等地开始出现强降雨,北京市中南部、天津市、河北省中南部和东北部、山西省东部、河南省北部、山东省西南部等地部分地区累计降雨量 100~250 mm,河北省保定、石家庄、邢台、邯郸市,山西省阳泉、晋中、晋城市,河南鹤壁和新乡市等地 300~480 mm,河北省石家庄、邢台、邯郸市局地 500~580 mm,最大单站累计降雨量出现在河北省邢台市临城县(1 008 mm)。为了解本次暴雨强度以及洪水过程,水利部水土保持监测中心在河北省邢台市临城县开展了第 5 次暴雨洪水的调查工作。

1 研究区概况

临城县地处太行山东麓、河北省邢台市北部,北纬 $37^{\circ}20'$ — $37^{\circ}35'$,东经 $114^{\circ}03'$ — $114^{\circ}38'$ 之间。临城县位于太行山区,县境内地形特征是西高东低,地形复杂,地貌自西向东大致可分为低中山、低低山、低丘垄岗和山前平原 4 个形态。临城县属于海河流域子牙河水系。县境内的主要河流有:泝河、午河和小槐河 3 条河流。临城县属于暖温带半湿润季风型大陆性气候,四季分明。冬季受西伯利亚大陆性气团控制,寒冷少雪;春季受蒙古大陆性气团影响,偏北风或西北风盛行,降雨稀少,蒸发量大,往往形成干旱天气;夏季受海洋气团及太行山山地地形影响,降雨集中,由于影响该县降雨的海洋气团每年进退时间不

一,往往形成多旱少雨或暴雨成灾;秋季多受高压控制,一般年份秋高气爽,降雨偏少^[16]。临城县划分为山地棕壤、褐土、草甸土等 13 个土类,8 个亚类,26 个土属,47 个土种。山地棕壤占总面积的 3.7%,褐土占总面积的 87.4%,在全县面积最大,适合多种作物和林果牧草生长,草甸土占总面积的 3.7%。临城县有树种 83 个,适宜该县自然条件的优良树种有油松、毛白杨、椿树、桐柳、酸枣、板栗、柿子、蚕桑等,分布全县。受自然条件限制,低山区 3 个乡均属片麻岩地带,治理难度大,水土流失严重,全县森林覆盖率只有 9.11%。临城县的水土保持工作起步较早,20 世纪 90 年代至今,先后实施了河北省重点小流域建设工程、太行山国家一期水土流失重点治理工程、太行山国家二期水土流失重点治理工程项目,山区陡坡开

荒。2013—2023 年相继实施了 13 条小流域的水土保持综合治理工程,治理水土流失面积 130 km²。

本次暴雨调查的重点小流域选择依据为:①考虑降雨情况,一般在降雨中心及周围一定降雨梯度内选择不同的小流域;②考虑不同治理标准,从而可以对比水土保持措施及其标准在特大暴雨中的效益,对于国家重点治理工程可重点考虑;③考虑不同土地利用类型;④小流域大小适中,一般不小于 0.2 km²,但不大于 2 km²,以便于野外调查。基于此,本调查选取临城县北泚河流域皇迷东沟小流域和蝎子沟流域梁家庄西沟作为重点调查小流域,基本情况详见表 1。其中,皇迷东沟位于临城县西北部,位于水土保持措施区域内,梁家庄西沟位于临城县西部,位于水土保持措施区域内外。

表 1 调查小流域基本情况

Table 1 Basic information of study area

小流域名称	面积/hm ²	次降雨/mm	土壤类型	植被状况	土地利用类型	水土保持措施
皇迷东沟	79.22	608.1	褐土、草甸土	酸枣、板栗、毛白杨等	果园、林地	梯田、水平阶、谷坊
梁家庄西沟	57.95	999.7	褐土、草甸土	酸枣、油松、毛白杨等	林地、灌木	梯田、谷坊

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本研究收集了临城县梁家庄和阎家庄 2 个雨量站和西台峪和郝家庄 2 个水文站 7 月 28 日至 8 月 1 日逐小时雨量数据,根据《降水量等级(GB/T28592-2012)》(表 2)对暴雨程度定性。流量数据以实地测量为准。

表 2 不同时间段的降雨量等级划分

Table 2 Classification of rainfall levels at different times

降水量等级	降雨量/mm	
	12 h 降雨量	24 h 降雨量
微量降雨	<0.1	<0.1
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100.0~249.9
特大暴雨	≥140.0	≥250.0

2.2 研究方法

2.2.1 野外调查 根据《水文调查规范(SL196-2015)》的要求,小流域洪峰流量调查通过调查洪水痕迹(简称洪痕)估算流量。

(1) 调查断面选择。调查断面满足以下条件:河/沟较顺直,顺直段长度一般是调查断面宽度的 5~10 倍,河床/沟床稳定,无壅水、回水、分流或较大

支流汇入(图 1a)。

(2) 洪痕调查。核查走访:根据前期地形、植被、影像数据研判,核查流域的总体状况,包括流域主要沟道分布、道路和排水情况。通过现场勘查、村民访谈,调查了解小流域行洪通道,以及暴雨过程中和暴雨结束后,洪水位和洪水淹没范围的相关情况(图 1b)。对主要沟道和洪水影响较大的区域重点调查,寻找相关的洪痕位置。主要以植被上的水印、泥印,树干上挂的枯落物,以及墙壁上的水印等为主要线索,并结合村民访谈做必要的验证。对于明确的洪痕位置进行记录(包括地理位置、标志照面、洪痕高度等)。

确定断面。通过洪水过后植被上的水印、泥印,树干上挂的枯落物等查找洪痕,过水断面两侧均需要有明显的洪痕。记录洪痕高程。在调查到明显洪痕的位置中,选择小流域出口附近,断面相对规则、河道顺直(顺直段长度达到了调查断面宽度的 10 倍以上)、河床稳定、无壅水、回水、分流或较大支流汇入的位置作为洪峰流域计算断面,测量断面尺寸、河床糙率信息和河道比降(图 1c)。具体的量测记录包括:①定点。确定调查断面后,将顺直河段的中间部位定为过水断面,记录断面经纬度。(图 1d);②过水断面测量:现场皮尺测量过水断面尺寸;确定过水断面每一个转折点的位置,同时在表中勾绘过水断面示意图,标明两点之间的相对高度和宽度。(图 1e);③测量沟道比降:利用带有测量坡度功能的激光测距仪测

量顺直段的沟道平均坡度,测量 3 次,取平均值,然后计算平均坡度的正切值,得到沟道比降。

(3) 过水断面测量。可实地量测或利用无人机搭载激光雷达等方式获取。具体方法为:将顺直河段

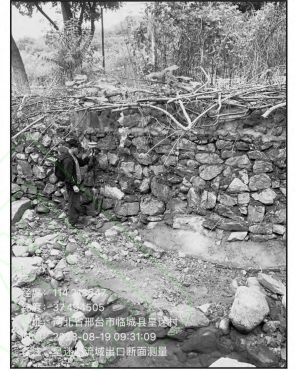
的中间部位定为过水断面,并用 GPS 定位利用激光测距仪测定过水断面尺寸,确定过水断面每一个转折点的位置,同时勾绘过水断面示意图,标明两点之间的相对高差和距离。



a 调查断面选择



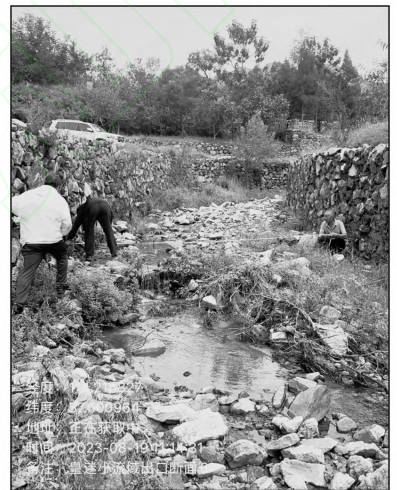
b 核查走访



c 确定断面



d 定点



e 过水断面测量

图 1 野外调查步骤

Fig.1 Field survey steps

2.2.2 洪峰流量估算 根据野外调查结果对数据进行了处理,主要包括沟道分级、断面剖面绘制、复合河槽综合糙率计算和洪峰流量计算等。为了绘制调查断面将现场测的断面数据导入 Excel 软件,通过计算,获得了各个断面的湿周和过水断面面积,在此基础上,计算了水力半径、流速和调查的各过水断面的洪峰流量。

(1) 过水断面面积计算。根据转折点处的测量数据,将断面分为若干个子断面分别进行计算,各部分过水断面形状可能为三角形、矩形或梯形,在计算时统一按照梯形面积计算公式进行计算,总的过水断面面积为各子过水断面面积之和^[17]:

$$A = \sum_2^n \frac{1}{2} \times (H_i + H_{i-1}) \times b_i \quad (1)$$

$$H_i = \sum_1^i h_i \quad (2)$$

式中: A 为过水断面面积(m^2); H_i 为第 i 个测点的水深(m); b_i 为距第 $i-1$ 个测点的水平距离(m); h_i 为所测的第 i 个和第 $i-1$ 个测点之间的高差(m),第 i 个测点相较第 $i-1$ 个测点向下为正,向上为负。

(2) 水力半径计算。水力半径由过水断面的断面面积和湿周确定,计算公式^[18]为:

$$R = \frac{A}{P} \quad (3)$$

$$P = \sum_1^n \sqrt{b_i^2 + h_i^2} \quad (4)$$

式中: R 为水力半径(m); P 为湿周(m)。

(3) 洪峰流量计算。根据计算得到的过水断面面积和水力半径,按曼宁公式^[19]进行各过水断面洪峰流量的估算^[20]。

$$Q = A \cdot V \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (6)$$

式中： Q 为流量 (m^3/s)； V 为流速 (m/s)； n 为曼宁系数(或糙率,取值详见表 3)； R 为水力半径 (m)； J 为沟道比降 (m/m)。

$$C = \frac{\overline{Q_{\max}}}{F} \quad (7)$$

式中： $\overline{Q_{\max}}$ 为断面洪峰流量均值 [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$]； F 为小流域面积 (km^2)。

表 3 常见明渠水流河床物质组成及其对应的曼宁系数
Table 3 Material composition of common open channel flow bed and corresponding Manning coefficient

	物质组成	曼宁系数
沟底及两侧都有砾石	混泥土	0.012
	混泥土	0.02
	浆砌石	0.023
	干砌石	0.033
自然河道	无草、潭的顺直河道	0.03
	有草和潭的河道	0.05
	有灌和树干的河道	0.1
	草	0.035
洪积平地	农作物	0.04
	稀疏灌丛和草	0.05
	密植灌丛	0.07
	密植有林地	0.1

3 结果与分析

3.1 降水时空分布特征

临城县典型调查小流域皇迷东沟 (0.8 km^2) 和梁家庄西沟 (0.6 km^2) 附近的雨量站实测降雨量过程线如图 2 所示。距皇迷东沟最近雨量站为阎家庄站,梁家庄西沟最近雨量站为梁家庄站。从图 2 可以看出,本次降雨从 7 月 29 日开始,7 月 31 日结束,总体上持续时间长、雨强大。对比阎家庄和梁家庄雨量可知,阎家庄和梁家庄累计雨量分别达到 613.6 mm 和 1 008.5 mm;最大单小时雨量分别为 57.3 和 48.1 mm,阎家庄雨量站的峰值出现在 7 月 31 日 3:00,而梁家庄雨量站有多个降雨高峰,7 月 29 日 21:00 与 7 月 30 日 15:00 均为高峰期,虽然阎家庄雨量站降雨峰值较大,但是梁家庄雨量站的降雨量峰值持续时间更长,累计洪量更大。根据表 2 可以判断出本次暴雨属于特大暴雨类型。

(4) 洪峰流量模数计算。洪峰流量模数计算公式为:

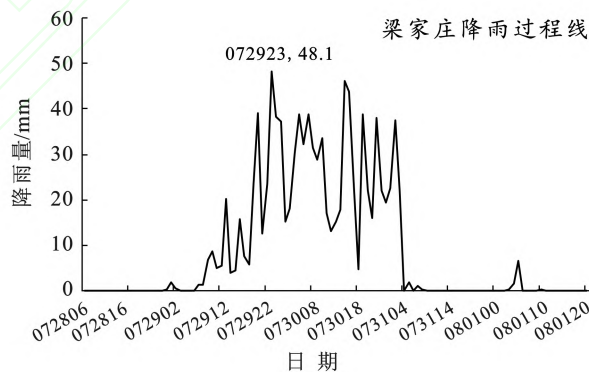
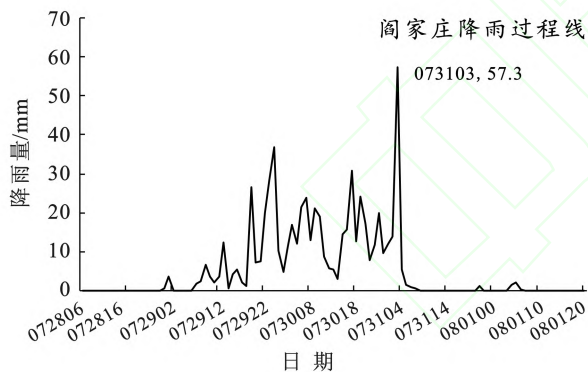


图 2 特征雨量站降雨过程线

Fig.2 Characteristic rainfall process line of rain measuring station

3.2 洪峰流量特征

3.2.1 典型洪峰流量断面调查 通过对无人机影像的分析及现场勘察,对皇迷东沟和梁家庄西沟主要沟道和洪水影响较大的区域开展了重点调查,寻找相关洪痕位置。主要以杂草整体倒向、枯物杂物印迹、泥印,以及坡壁上水印等为主要线索,并结合村民访谈,以确定本次暴雨形成最高水位的洪痕,梁家庄西沟以及皇迷东沟的洪痕位置如图 3 所示。

皇迷东沟和梁家庄西沟 2 个小流域主沟道经过了治理,皇迷东沟主沟道为两侧浆砌石,本次暴雨主沟道基本完好;梁家庄西沟主沟道修建了台地,田坎为石坎(干砌石),主要种植板栗,少量玉米,本次暴雨中主沟道部分田坎垮塌。在调查到明显洪痕的位置

中,调查组选择了断面相对规则、河道顺直、河床稳定、无壅水、回水、分流或较大支流汇入的位置,作为后续洪峰计算断面。本次调查分别确定了皇迷东沟 6 个断面,梁家庄西沟 3 个断面,各断面在小流域中的位置如图 3 所示。针对每一个断面,调查组测量了断面尺寸,拍摄了断面的照片,填写了调查表;同时,沿纵断面的洪痕,测量高程,以获取比降。各断面剖面如图 4 所示。由图 4 可以看出,皇迷断面(1—3)有清晰的河道边界范围,两侧有人为修建的浆砌石对河道进行加固,河道中仅有碎石,杂草较少,河道平整,两侧植被较少,横断面起伏是由于碎石的缘故。皇迷断面(4—6)也有较为清晰的河道以及浆砌石加固的措施,河道周边有梯田以及台地等水土保持措施,河

道内的石块比皇迷断面(1—3)的石块更大且更密集,河道内有大量杂草。相比较来看,梁家庄的河道断面不如皇迷河道断面明显,且没有浆砌石护坡等水土保持措施干预,河道依然有大量碎石以及杂草,穿过林

地,河道周边植被复杂且茂盛。

根据研究区 9 个横断面剖面图绘制皇迷东沟和梁家庄西沟 2 个小流域调查洪峰流量纵断面,如图 5 所示。

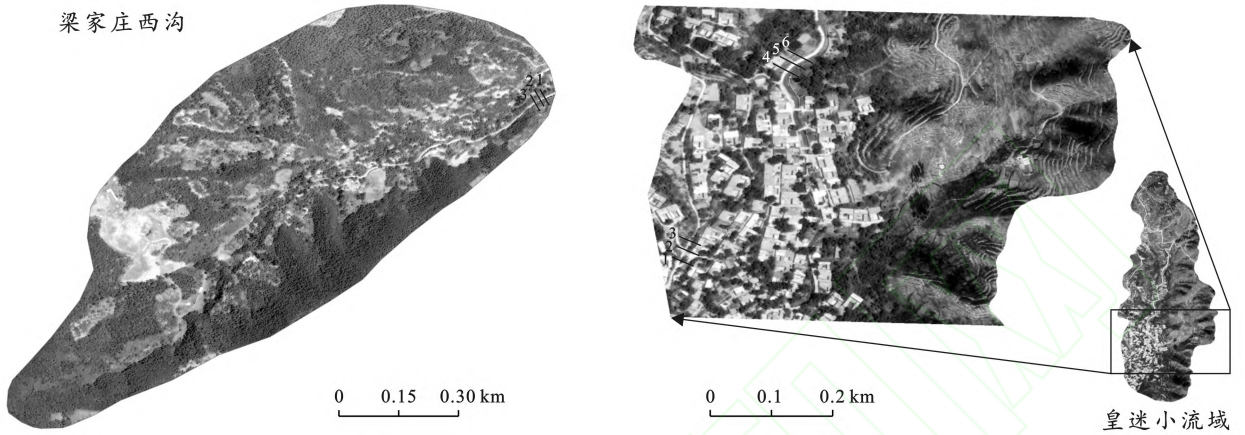


图 3 典型洪峰洪痕位置

Fig.3 Flood mark location of typical flood peak

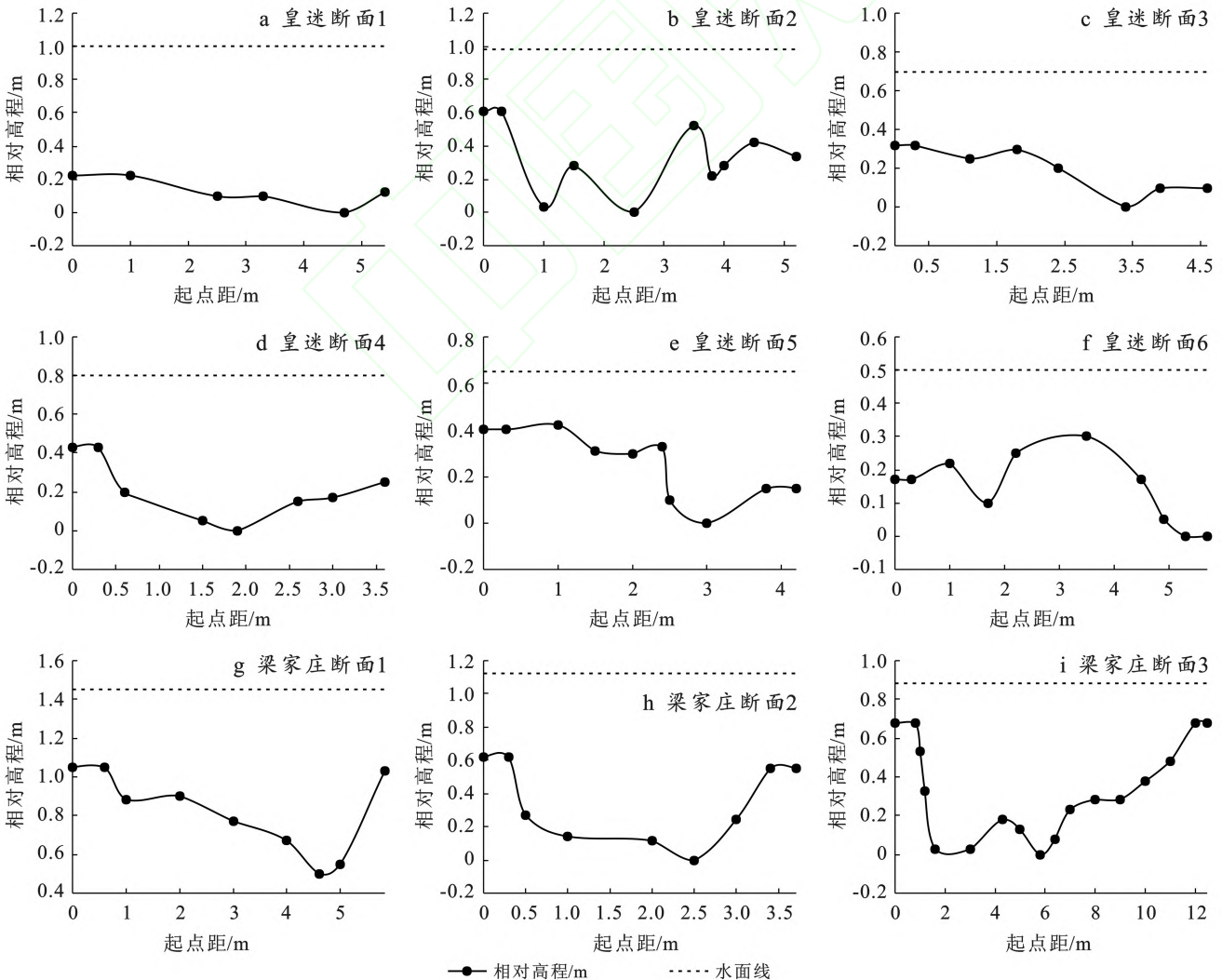


图 4 典型洪峰各横断面剖面

Fig.4 Cross section of typical flood peak

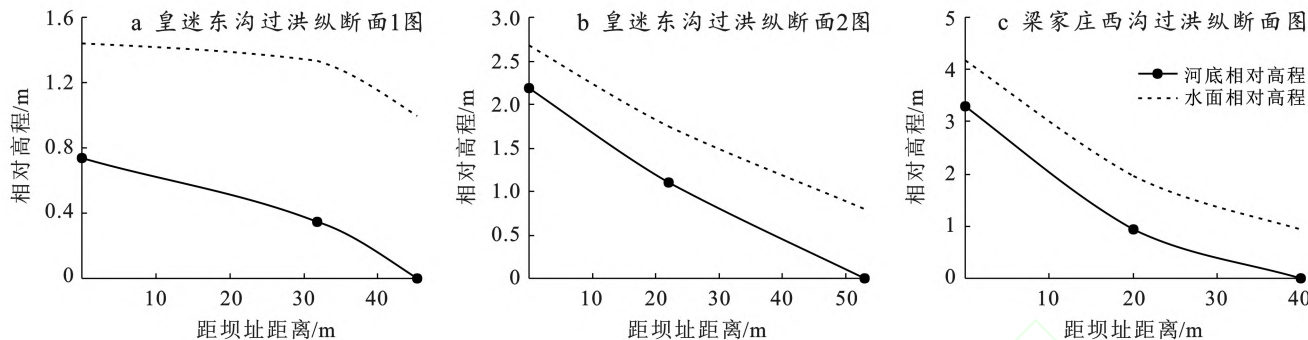


图 5 过洪纵断面图

Fig.5 Flood longitudinal profile picture

3.2.2 洪峰流量计算 本次暴雨洪水后所调查皇迷东沟和梁家庄西沟 2 个小流域洪峰流量计算相关参数详见表 4。

对于不同断面的实际情况对曼宁系数进行选取，

根据曼宁公式，分别计算了皇迷东沟 6 个断面和梁家庄西沟 3 个断面的洪峰流量，皇迷东沟的洪峰流量模数为 $10.80 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ，梁家庄西沟的洪峰流量模数为 $36.07 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。

表 4 皇迷东沟和梁家庄西沟小流域洪峰流量计算相关参数

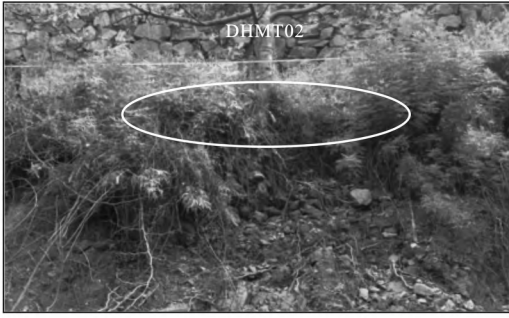
Table 4 Related parameters of flood peak discharge calculation in Huangmian east ditch and Liangjiashuang west ditch small watershed

项目	皇迷 1	皇迷 2	皇迷 3	皇迷 4	皇迷 5	皇迷 6	梁家庄 1	梁家庄 2	梁家庄 3
面积/ m^2	5.15	3.61	2.36	2.36	1.70	1.82	3.78	3.23	7.50
湿周/m	7.02	6.80	5.62	4.64	5.14	6.59	6.85	5.17	13.19
水力半径/m	0.73	0.53	0.42	0.51	0.33	0.28	0.55	0.62	0.57
平均比降	0.016 3	0.016 3	0.016 3	0.041 1	0.041 1	0.041 1	0.059 5	0.059 5	0.059 5
糙率	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05
洪峰流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	17.84	10.08	5.63	7.62	5.47	5.20	20.63	19.17	25.13
洪峰流量模数/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$				10.80					36.07

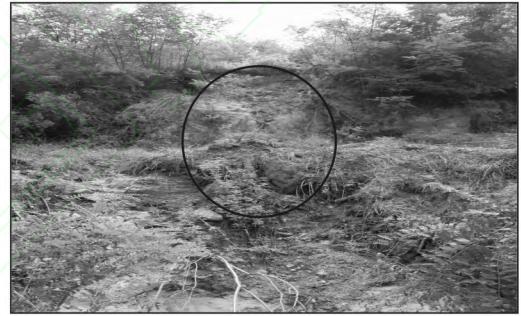
3.3 土壤侵蚀特征

土壤侵蚀的调查以细沟及切沟侵蚀、重力侵蚀以及工程措施损毁 3 方面开展调查。本次调查中两个小流域在坡耕地，梯田、台地在现场调查过程中未发现细沟。由于临城县的水土保持工作起步较早、封山育林措施执行比较到位，水土流失治理工程较为完善，切沟发育在本次暴雨中比较少，对影像解译结果采用全覆盖方式调查新成切沟与沟头有溯源发育的切沟。皇迷东沟影像解译切沟 6 条，土地利用均为梯田式果园，果园都进行过水保措施改造，且均为新成切沟。梁家庄西沟没有发现切沟侵蚀。侵蚀图片及侵蚀位置如图 6a 所示。根据野外调查结果与分析，皇迷东沟的重力侵蚀有两处，以果园为主，调查类型为崩塌，其侵蚀和堆积面积分别为 16.5 和 6.4 m^2 ，侵蚀和堆积体积分别为 26.2 和 1.9 m^3 ，流失体积 24.3 m^3 ，侵蚀量 39.9 t ，平均侵蚀深 1.6 m ，平均流失深 1.5 m ；梁家西沟以林地为主，调查类型为泥石流，无堆积，侵蚀面积 403.1 m^2 ，侵蚀体积和流失体积均为 342.6 m^3 ，侵蚀量 548.2 t ，平均侵蚀深和流失深均为 0.9 m 。根据各种重力侵蚀发生的情况，并结合野外实际调查，本次暴雨过程引发的重力侵蚀中，崩塌

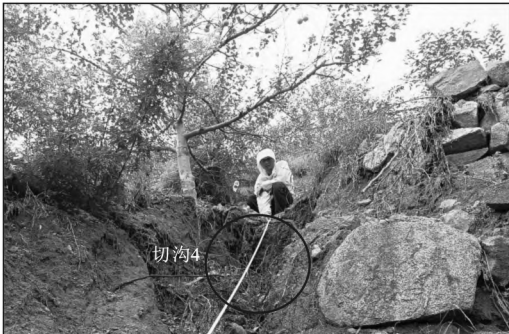
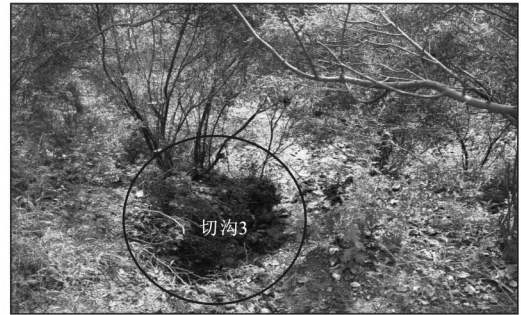
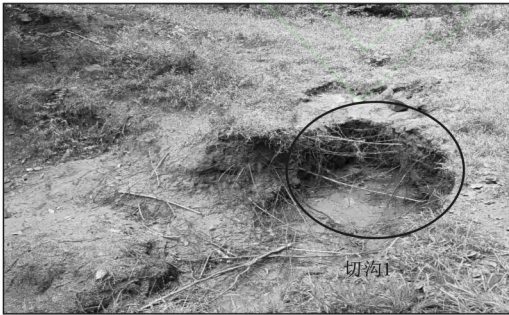
和泥石流是主要类型。在调查的小流域中，均发生了崩塌；从发生重力侵蚀的总面积上来看，崩塌也是 3 种重力侵蚀形式中面积最大的。侵蚀图片及侵蚀位置如图 6b 所示。本次调查小流域内水土保持措施损毁主要为梯田损毁，其损毁方式主要为田坎滑塌/崩塌，也有切沟侵蚀和泥石流存在。梯田损毁情况随梯田类型、田面宽度、田坎高、田坎保护情况变化较大。皇迷东沟小流域共有田坎 707 条，其中 4.10% 的田坎 (29 条) 不同程度受损，全部 707 条田坎平均田坎受损率为 0.27%，29 条出现受损的田坎平均受损率为 6.52%，22.64% 的田坎受损，平均田坎受损率为 0.27%。梁家庄细沟小流域共有田坎 32 条，田坎 5 块，均未受损。梁家西沟共有谷坊 30 个，仅 1 个发现损毁，受损比例为 3.33%，谷台地则共有 6 块，仅 1 块发现损毁，受损比例为 16.67%。皇迷沟小流域属高度治理流域，水土保持措施完备，其谷坊材质为浆砌石，在本次暴雨中未发现谷台地、谷坊受损。(图 6c) 整体上，小流域耕地面积占比越大，谷坊、谷台地损毁越严重。此外，无论是浆砌石或干砌石在此次暴雨中损毁率均较低，并未表现出明显差异。损毁图片及损毁位置如图 6c 所示。



a 切沟侵蚀



b 重力侵蚀



c 工程措施损毁情况

图 6 研究区的侵蚀情况

Fig.6 Trenching erosion in the study area

4 讨论

4.1 小流域洪峰流量准确性分析

根据表4中对比洪峰流量可以看出,皇迷断面(1—3)洪峰流量大于皇迷断面(4—6),由于地形原因,在断面4—6的河道中,碎石和杂草比断面1—3多,阻隔了洪水漫延,降低了洪水的洪峰流量。梁家庄的洪峰流量大于皇迷东沟的洪峰流量,分析原因有以下3点:①梁家庄西沟小流域本次暴雨累计雨量(1 008.5 mm)显著大于皇迷东沟(613.6 mm),形成的洪水速度较快,强度较大;②梁家庄西沟小流域平均坡度大于皇迷东沟,暴雨条件下导致汇水较快,产流较大;③梁家庄河道没有像皇迷河道一样的浆砌石措施,河道边界不明显且较矮,洪水容易蔓延。已有研究表明^[21],洪峰流量随着沟道坡度的增大而增大,呈现良好的线性关系,且随着降雨重现期的减小,沟道坡度对洪峰的影响更显著。盛菲等^[22]人提出场次暴雨条件下,河道边界的变化对洪峰流量的平均贡献率为52.8%。以上研究说明了河道地形以及河道边界对于洪峰流量的影响是巨大的。根据测量的断面洪痕计算的洪峰流量均值作为标准值,用各断面实际洪峰流量与标准值进行误差计算。通过表4可以得出,各个断面的误差分别为37%,3.4%,49.6%,20%,10%,14.7%,4.7%,7%,17.9%。仅有皇迷断面3误差相对较大,考虑到错峰作用以及各个断面的

沟道坡度和河道边界的差异性,由洪痕法估算出的沟道洪峰流量基本准确。

4.2 小流域和水文站洪峰流量对比

本次调查收集了小流域下游郝家庄、西台峪2个水文站流量过程资料,流量过程线如图7所示。郝家庄、西台峪水文站位于海河流域子牙河水系泚河,集水面积分别为142,127 km²。本次暴雨产生的洪水过程中,最大流量分别出现在7月31日4:00和7月31日3:44,最大流量分别为806和1 136 m³/s,洪峰流量模数分别为5.68,8.94 m³/(s·km²)。经过对比郝家庄水文站和西台峪水文站所测量的洪水过程,可以看出本次暴雨洪水有如下特点:①洪水的涨水退水过程都较慢;②在7月30日下午5:00左右达到一个小高峰,流量为400~500 m³/s;③郝家庄水文站和西台峪水文站在7月31日凌晨4:00左右达到洪水高峰,流量分别为806和1 136 m³/s,峰高量大;④整个洪水过程开始于7月29日晚上10:00,结束于8月2日0点,共历时74 h,与雨量站测量结果具有一致性。

比皇迷东沟、梁家庄西沟2个小流域洪峰流量模数[10.80和36.07 m³/(s·km²)]和郝家庄、西台峪水文站的洪峰流量模数[5.68和8.94 m³/(s·km²)]发现,本次调查小流域洪峰流量模数大于下游水文站洪峰流量模数,主要由于调查小流域位于泚河流域上游,是本次洪水的主要产流区。

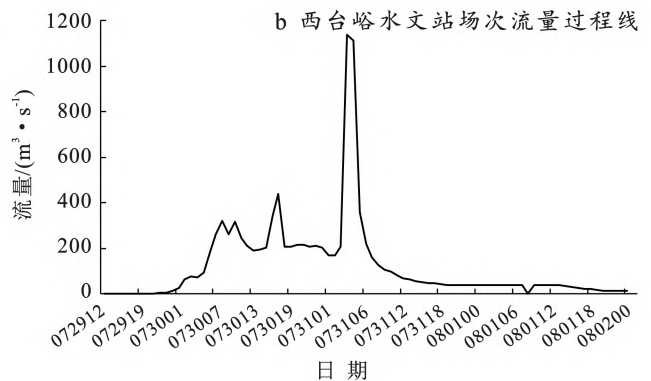
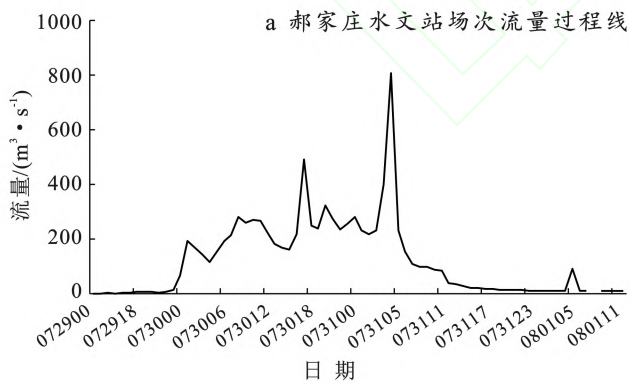


图7 场次暴雨洪水过程线图

Fig.7 Map of rainstorm flood process

4.3 土地利用类型及水土保持措施对洪水的影响

利用人工目视解译方法,基于无人机影像,对皇迷东沟和梁家西沟流域土地利用类型和水土保持措施进行了解译,并进行了野外校核,解译结果如图8所示。由图8可以看出,皇迷东沟小流域土地利用类型以果园为主,所占比例达到65.60%,其次为林地,有林地和灌木林地比例达到14.64%,农村建设用地

占比也比较多,比例达到13.99%。梁家庄西沟流域土地利用类型主要以林地为主,有林地和灌木林地比例达到66.89%,其次为果园,比例为25.54%,其余土地利用类型比例不足8%。皇迷东沟属于水土保持措施范围内,梁家庄西沟在水土保持措施外,皇迷东沟的工程措施以梯田为主,辅以少量水平阶和谷坊,梯田占总面积比例的49.80%。梁家庄西沟的

工程措施主要以梯田和谷坊为主,其中梯田所占比例为 6.81%,谷坊比例为 3.39%。皇迷东沟的土地利用类型中果园占比比梁家庄西沟多 40.06%,而梁家庄西沟的土地利用类型中有林地及灌木占比比皇迷东沟多 52.25%,皇迷东沟水土保持措施中的梯田和谷坊占比分别比梁家庄西沟多 42.99%和 18.97%。土地利用类型与水土保持措施对延长洪水历时没有

明显影响,但会减小洪峰流量,减小幅度为 38.78%。土地利用类型与水土保持措施对不同量级降雨量的洪峰流量减幅不同,对较小量级降雨量的洪峰流量减幅较大,而对较大量级降雨量的洪峰流量减幅较小^[23]。因此皇迷东沟小流域的洪峰流量模数小于梁家庄西沟,土地利用类型以及水土保持措施是重要的因素。

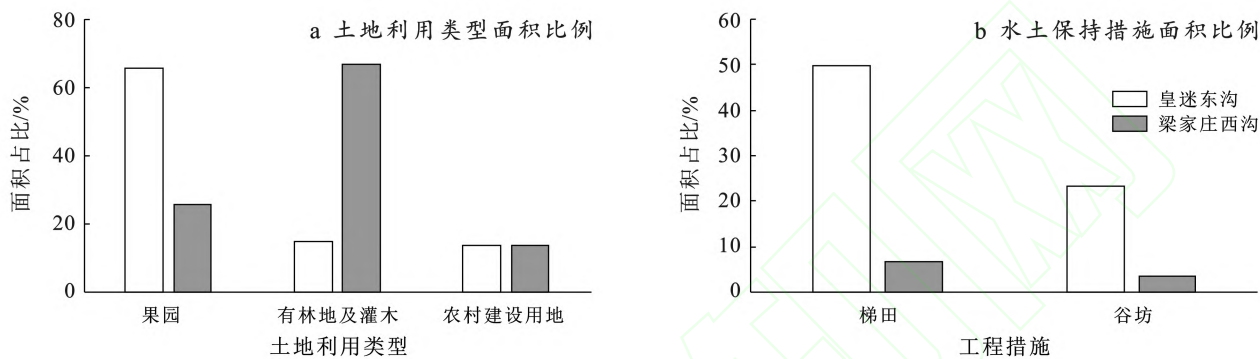


图 8 研究区土地利用类型以及水土保持措施占比图

Fig.8 Land use type and proportion of engineering measures in study area

4.4 土壤侵蚀的影响因素分析

根据野外调查的结果来看,梁家庄西沟不仅洪峰流量模数大于皇迷东沟,其侵蚀程度比皇迷东沟侵蚀程度更加严重。这种情况的原因是多方面的,首先,皇迷东沟位于水土保持措施内,水土保持措施比梁家庄西沟完善许多。已有学者^[24-25]开展过相关研究。冯家豪^[26]发现在一系列水土流失治理措施及大规模退耕还林工程的影响下,变化期单位径流的输沙量明显下降;Zhao等^[27]的研究显示,由于水土保持措施的大规模实施,土壤侵蚀强度和水土保持措施的相关性在 2006—2012 年明显上升。张新和等^[28]提出在其他条件一定时,汇水面积和坡面汇水长度对侵蚀沟的形成与发展起到了决定性作用,可以通过减小汇水坡长、减少坡地径流的水土保持耕作方法,减少坡长的有效值以减少上方汇水面积和汇水量,防止切沟发生。所以土地利用类型、植被状况、水土保持措施是防止侵蚀和损毁的有效手段。其次梁家庄西沟的地形、地貌及坡度等因子也是影响土壤侵蚀的主要因素。黄晨璐^[29]提出了在水土保持措施因子效益较差的区域,坡度坡长是该区域土壤侵蚀强度的主控因子。经现场调研,发生重力侵蚀的条件主要受控于坡度和汇水。对于崩塌而言,其发生部位主要发生较陡的坡面(如陡坎),其坡度一般都很大,在强降雨条件下,原本稳定的陡坎边坡下部受到流水的,失去稳定性,从而发生崩塌。对于滑坡和泥石流,其发生区域坡度一般在 25°以上,同时其上方坡面上汇水面积通

常较大,且坡长较长,在强降雨的条件下,土体水分含量增高,容易发生滑坡和泥石流。除此之外,降雨量也是影响土壤侵蚀重要的气候因素,梁家庄西沟和皇迷东沟虽然距离较近,但梁家庄西沟的洪峰流量模数是皇迷东沟的 3 倍以上,雨量和雨强是影响土壤侵蚀的两个最基本的降雨特征量。已有研究表明^[30-31],土壤侵蚀与降雨量的正相关关系不显著,产生这种现象的原因主要是因为坡面产沙不同于坡面产流,He等^[32]人提出,产流量与降雨前期土壤含水量密切相关,而土壤含水量与降雨量密切相关,从而使得降雨量对径流量的影响相对较大;侵蚀量除与土壤组成、坡度有关外,主要取决于地表径流侵蚀力的大小。当雨强不断增大时,击溅能力随之增强,对土壤表层稳定性的破坏增大,侵蚀力就越大,因此侵蚀量与降雨强度的关系更密切^[33]。

5 结论

(1) 本次降雨从 7 月 29 日开始,8 月 1 日结束,总体上持续时间长、雨强大,梁家庄西沟和皇迷东沟累计雨量依次为 1 008.5 和 613.6 mm。

(2) 本次暴雨形成了洪水过程,皇迷东沟、梁家庄西沟小流域洪峰流量模数为 10.80 和 36.07 m³/(s·km²)。坡度和水土保持措施是影响洪峰流量的重要因素。

(3) 小流域洪峰流量模数和下游水文站的结果对比,本次调查小流域洪峰流量模数大于下游水文站

洪峰流量模数。

(4) 梁家庄西沟的土壤侵蚀情况比皇迷东沟严重,水土保持措施、坡度以及降雨强度的差异性的重要因素。

(5) 本次调查反映出实施水土保持措施是必要且有效的,而且要进一步完善梯田、台地谷坊的建设。良好的水土保持措施可以有效减少洪峰流量以及侵蚀现象的发生。结合本次暴雨调查成果以及本文不足之处提出展望:①应在暴雨过后及时开展暴雨调查。②提高影像的精度。由于暴雨调查的时间紧任务重,无法在短时间内展开详细调查测量以及取样,因此提高影像精度可以作为有力的技术支撑。③在实地调查中可以进一步测量侵蚀数据,建立模型分析侵蚀情况,量化土壤侵蚀数据,为今后的水土保持措施管理制度提供参考和支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 乔殿新,冯伟,王飞,等.台风“利奇马”暴雨引发的流域产流产沙特征:以山东省临朐县为例[J].水土保持研究,2022,29(2):31-35,42.
Qiao Dianxin, Feng Wei, Wang Fei, et al. Characteristics of sediment production and abortion in a basin induced by Typhoon Lichima: A case study in Linqu County, Shandong Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):31-35,42.
- [2] 党维勤,党恬敏,张泉,等.“7·26”暴雨调查对黄土高原水土保持工作的启示[J].中国水土保持,2021(3):24-27.
Dang Weiqin, Dang Tianmin, Zhang Quan, et al. Implications of the “July 26” rainstorm survey on soil and water conservation in the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China,2021(3):24-27.
- [3] 阎思宇,李斌斌,于坤霞,等.2022年“7·13”暴雨下生产道路侵蚀强度调查:以宁夏回族自治区西吉县五十岔小流域为例[J].水土保持通报,2022,42(6):14-22.
Yan Siyu, Li Binbin, Yu Kunxia, et al. Investigation on erosion intensity of production road under “July 13” rainstorm in 2022: A case study of Wicha small watershed in Xiji County, Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):14-22.
- [4] 何奂.泾河流域降雨侵蚀力的时空变化[J].广东气象,2022,44(6):25-28.
He Huan. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Jinghe River Basin [J]. Guangdong Meteorology, 2022,44(6):25-28.
- [5] 王任超,凌璐璐.浅议水土保持在防洪减灾中的作用[J].黑龙江科技信息,2009(11):196-197.
Wang Renchao, Ling Lulu. A brief discussion on the

role of soil and water conservation in flood control and disaster reduction [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2009(11):196-197.

- [6] 刘沛好.郑州“7·20”特大暴雨大坡小流域水土流失灾害调查与评价[D].山东泰山:山东农业大学,2023.
Liu Peiyu. Investigation and Evaluation of Soil and Water Loss Disaster in the “July 20” Rainstorm in Zhengzhou [D]. Taishan, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [7] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐2019年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J].水土保持学报,2021,35(1):149-153.
Lin Zading, Liu Baoyuan, Cong Peijuan, et al. Investigation on soil and water conservation of “8·10” heavy rain in Linqu, Shandong Province in 2019 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):149-153.
- [8] 盛菲,刘士余,陈子惟,等.场次暴雨条件下濼水流域水沙关系探究[J].农业工程学报,2023,39(3):68-75.
Sheng Fei, Liu Shiyu, Chen Ziwei, et al. Study on water-sediment relationship in the Lian River Basin under rainstorm conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(3):68-75.
- [9] 蒋熙,何保善,李凯.暴雨的危害及其防御对策[J].现代农业科技,2017(14):231-235.
Jiang Xi, He Baoshan, Li Kai. The harm of rainstorm and its prevention measures [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(14):231-235.
- [10] 余萍,李建柱,刘阳.基于实测暴雨洪水资料的流域水土保持工程对洪水特征影响程度估算[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):90-95.
Yu Ping, Li Jianzhu, Liu Yang. Estimation of the impact of soil and water conservation projects on flood characteristics based on measured rainstorm flood data [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014,28(7):90-95.
- [11] 魏兆珍.海河流域下垫面要素变化及其对洪水的影响研究[D].天津:天津大学,2015.
Wei Zhaozhen. A study on changes of underlying surface elements and their effects on flood in Haihe River Basin [D]. Tianjin: Tianjin University,2015.
- [12] 冯平,李建柱,徐仙.潘家口水库入库水资源变化趋势及影响因素[J].地理研究,2008,27(1):213-220.
Feng Ping, Li Jianzhu, Xu Xian. Change trend and influencing factors of water resources in Panjiakou Reservoir [J]. Geographical Research, 2008,27(1):213-220.
- [13] 韩瑞光,冯平.流域下垫面变化对洪水径流影响的研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):27-30.
Han R uiguang, Feng Ping. Impact of underlying surface change on flood runoff in a basin [J]. Journal of

- Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 27-30.
- [14] Li Jianzhu, Feng Ping. Runoff variations in the Luanhe River Basin during 1956—2002 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 339-350.
- [15] 乔殿新, 柳庆斌, 党恬敏, 等. 场次暴雨水土保持调查探索与思考[J]. 中国水土保持, 2021(10): 13-15.
Qiao D ianxin, Liu Qingbin, Dang Tianmin, et al. Investigation and consideration on soil and water conservation in rainstorms [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(10): 13-15.
- [16] 临城县地方志编纂委员会编. 临城县志[M]. 北京: 团结出版社, 1996.
Edited by Local Chronicles Compilation Committee of Lincheng County. Records of Lincheng County [M]. Beijing: Tuanjie Publishing House, 1996.
- [17] Yerokhin A L, Snizhko L O, Gurevina N L, et al. Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(17): 2110-2111.
- [18] Cheng Nansheng, Nguyen H T. Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(9): 995-1004.
- [19] Manning R. On the flow of water in open channels and pipes [J]. Institution of Civil Engineers of Ireland, 1889, 20: 161-207.
- [20] Pinder G F, Jones J F. Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff [J]. Water Resources Research, 1969, 5(2): 438-445.
- [21] 曾杉. 相同降雨过程下洪水对不同流域地形响应的概化试验研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2018.
Zeng Shan. Generalized Experimental Study on Response of Flood to Topography of Different Basins under the Same Rainfall Process [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2018.
- [22] 盛菲. 场次暴雨条件下降雨和植被变化对洪水影响的定量研究[D]. 江西 南昌: 江西农业大学, 2022.
Sheng Fei. Quantitative Study on the Impact of Rainfall and Vegetation Change on Flood Under the Condition of Rainstorm [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2022.
- [23] 程文飞, 陈军锋, 张飞, 等. 不同水保措施对不同量级降雨量汇流的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 96-99.
Cheng Wenfei, Chen Junfeng, Zhang Fei, et al. Effects of different water conservation measures on rainfall confluence of different orders [J]. Yellow River, 2018, 40(9): 96-99.
- [24] 魏义长, 康玲玲, 王云璋, 等. 水土保持措施对土壤物理性状的影响: 以黄土高原水土保持世界银行贷款项目区为例[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 114-116.
Wei Yunchang, Kang Lingling, Wang Yunzhang, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil physical properties: a case study of Soil and water conservation project area in the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 114-116.
- [25] 徐建华, 金双彦, 高亚军, 等. 水保措施对“7·26”暴雨洪水减水减沙的作用[J]. 人民黄河, 2017, 39(12): 22-26.
Xu Jianhua, Jin Shuangyan, Gao Yajun, et al. Effect of water conservation measures on water and sediment reduction of “July 26” rainstorm flood [J]. Yellow River, 2017, 39(12): 22-26.
- [26] 冯家豪. 基于复合指纹识别技术的皇甫川流域场次洪水泥沙来源研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Feng Jiahao. Research on the Source of Sediment from Multiple Floods in Huangfuchuan Basin Based on Composite Fingerprint Recognition Technology [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [27] Zhao Guangju, Yue Xiaoli, Tian Peng, et al. Comparison of the suspended sediment dynamics in two Loess Plateau catchments, China [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(4): 1398-1411.
- [28] 张新和. 黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—一切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
Zhang Xinha. Study on the Evolution of Sheet Erosion, Rill Erosion and Trenching Erosion and the Process of Sediment Production on Loess Slope [D]. Shaanxi Yangling: Northwest A&F University, 2007.
- [29] 黄晨璐. 近40年黄土高原土壤侵蚀时空变化及其主控因子研究[D]. 陕西 西安: 西北大学, 2021.
Huang Chenlu. Spatiotemporal changes of soil erosion and its controlling factors in the Loess Plateau in recent 40 years [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwest University, 2021.
- [30] 陈强. 人工模拟降雨条件下重庆市黄壤坡耕地降雨侵蚀研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
Chen Qiang. Study on Rainfall Erosion of Cultivated Land on Yellow Soil Slope in Chongqing under Simulated Rainfall Conditions [D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [31] 刘刚才, 朱波, 代华龙, 等. 四川低山丘陵区紫色土不同土地利用类型的水蚀特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15(S): 96-99.
Liu Gangcai, Zhu Bo, Dai Hualong, et al. Water erosion characteristics of different land use types of purple soil in low hills of Sichuan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(S): 96-99.
- [32] He Jijun, Cai Qiangguo, Wang ZhongKe. Integrated

control measures and environmental effects in small basins in rocky area of Northern China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2010,25(3):294-303.

- [33] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].*农业工程学报*, 2017,33(22):159-166.

Xiao Jibing, Sun Zhanxiang, Liu Zhi, et al. Effects of rainfall erosion factors and vegetation types and coverage on soil erosion in sloping farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(22):159-166.

