

基于遥感影像研究极端暴雨条件下新成切沟发生发展规律

杨丽娟^{1,3}, 王春梅^{1,2,3*}, 张春妹^{1,3}, 庞国伟^{1,3}, 龙永清^{1,3}, 王雷^{1,3}, 刘宝元⁴,
杨勤科^{1,3}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710048; 4. 北京师范大学自然科学高等研究院, 珠海 519087)

摘 要: 土壤侵蚀严重破坏土地资源, 是全球性的环境问题, 切沟侵蚀是土壤侵蚀的重要表现形式, 近年来极端暴雨频发加剧了切沟侵蚀的发生和发展。为了研究气候变化条件下新成切沟的形成与发育规律, 该研究以陕北子洲岔巴沟流域王武沟小流域为研究区, 基于无人机航摄影像, 以 2017 年陕北“7·26”暴雨新成切沟为研究对象, 分析新成切沟发生规律, 并探讨在之后的 3 a 中其发育特征、与原有切沟发育的差异性及其与地形参数的关系。结果表明: 1) 在“7·26”暴雨中, 王武沟发育新成切沟 45 条, 约 101 条/km², 可分为坡面切沟、梯田切沟、道路切沟和底部切沟四类, 以坡面切沟最多, 底部切沟和梯田切沟总体更宽、面积更大; 生产道路、淤地坝和坡耕地在暴雨条件下是最容易发生切沟的地块; 2) 新成切沟在形成之后的 3 a 内沟头发育较原有切沟更为迅速。34.48% 的新成切沟沟头进一步前进, 这一数值为原有切沟的 1.32 倍; 新成切沟前进距离均值是原有切沟的 3 倍, 达 0.58 m/a; 3) 汇水面积增加可显著促进切沟沟头发育, 是模拟切沟沟头前进速率的重要地形指标。可见, 极端降雨条件下研究区土壤侵蚀严重, 新成切沟发生之后的 3 a 内溯源尤为迅速, 应给予特别关注, 加强对这类切沟的预防与治理。

关键词: 遥感; 无人机; 地形; 黄土高原; 极端暴雨; 切沟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.011

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-06-0096-09

杨丽娟, 王春梅, 张春妹, 等. 基于遥感影像研究极端暴雨条件下新成切沟发生发展规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 96-104. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.011 <http://www.tcsae.org>

Yang Lijuan, Wang Chunmei, Zhang Chunmei, et al. Occurrence and development of newly formed gullies under extreme rainstorm conditions using remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 96-104. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.011 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤侵蚀是气候、地质、地形、土壤等多种自然与人为因素综合作用的结果^[1], 是造成土壤质量退化、荒漠化与河库淤积等环境问题的主要原因^[2]。自 20 世纪以来, 受全球气候变化的影响, 极端降雨事件频发, 加剧了土壤侵蚀的危害, 给水土保持工作带来了严峻的挑战。切沟侵蚀是土壤侵蚀最严重的阶段^[3], 对土地资源的破坏极为严重, 是小流域产沙的重要来源, 在黄土丘陵沟壑区, 切沟侵蚀产沙占流域产沙量的 50% 以上^[4], 裸露的地面在暴雨的作用下更易形成新的沟蚀^[5]。气候变化背景下, 新成切沟往往发育更为迅速, 破坏土地, 造成严重土壤侵蚀, 成为黄河流域高质量发展中面临的新挑战, 亟需引起高度重视。

目前研究切沟发育的方法主要有三种: 一是通过室

内试验对侵蚀过程进行模拟并对其动态变化进行监测, 如张姣等^[6]以室内 4 场模拟降雨实验结合三维激光技术对沟蚀发育过程进行模拟。二是野外实地测量监测沟蚀的动态变化, 如王雷等^[7]对黄土高原 18 条支毛沟进行了实地观测, 初步认为降水、植被与水保措施、地形因子是侵蚀沟发育的主要影响因素。三是利用遥感影像或地形图叠加进行切沟发育研究, 如杨力华等^[8]对王茂小流域 50 a 间的三期遥感影像进行解译, 提取侵蚀沟及其影响因子, 发现王茂沟切沟发育速率在减缓, 土地利用是侵蚀沟变化的主要驱动因子; 陈一先等^[9]利用地形图生成的数字高程模型提取沟沿线, 结合地理信息系统手段对切沟的发育速率进行分析, 发现黄土高原林区覆盖可以减缓切沟发育。近年来无人机遥感也被广泛应用于切沟研究中, Guan 等^[10]将无人机影像与历史航测和实地测量相结合, 调查了黄土高原 46 个不同发育阶段的小流域, 结果表明沟头前进是切沟发育的主要形式。无人机影像分辨率相对更高, 一般可达厘米级, 数据获取时间更为灵活, 因此为特大暴雨条件下调查切沟的发育提供了重要数据源。

目前特大暴雨条件下切沟侵蚀问题已经引起学者的重视。如 Yuan 等^[11]调查了陕北无定河流域在“7·26”暴雨中降雨梯度与坡面切沟侵蚀之间的关系; 王颢霖等^[12]

收稿日期: 2021-12-18 修订日期: 2022-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977062、41601290); 国家重点实验室基金 (A314021402-2016); 陕西省重点科技创新团队项目 (2014KCT-27)

作者简介: 杨丽娟, 研究方向为土壤侵蚀动态变化。

Email: yanglijuan@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者: 王春梅, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为遥感与 GIS 应用、土壤侵蚀调查与模拟。Email: cmwang@nwu.edu.cn

对陕西子州“7·26”暴雨后坡耕地开展调查，研究坡位、坡度和坡形对细沟发育的影响；陈卓鑫等^[5]对陕北 2017 年“7·26”特大暴雨过程中不同土地利用类型坡面切沟发育特征进行了分析；Wang 等^[13]对道路浅沟、切沟进行实地测量分析了山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨道路侵蚀沟的发生规律。但目前有关这方面的研究仍处在初级阶段，对切沟发生规律认识远远不足，尤其是对于新成切沟在其形成后进一步的发育问题没有较为明确的认识，较难支撑针对这一类切沟的治理决策。

2017 年 7 月 25—26 日，陕西榆林发生了一场罕见的特大暴雨（简称“7·26”特大暴雨），造成了严重的土壤侵蚀^[14]，且在之后 3 a 均有暴雨发生，这为研究暴雨对切沟发育的影响提供了一个宝贵的机会。本文以上述暴雨为背景，基于谷歌影像、无人机航摄和现场调查，探讨新成切沟的发生规律，明确其与原有切沟发育特征的差异性，并阐明切沟发育特征与地形参数的关系，以期为极端降雨条件下的切沟防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王武沟流域为岔巴沟流域子流域，位于陕西省榆林市子洲县（109°57′31″~109°57′57″ E、37°42′51″~37°43′30″ N），属于黄土丘陵沟壑区第 I 副区（图 1）。流域面积约为 0.44 km²，平均海拔 1 033.09 m，平均坡度 29.57°。属于大陆性季风气候，年均降雨量为 450 mm，以夏季强降雨为主；土壤类型主要为黄绵土，粉粒为主，土质疏松；土地利用类型以草地和耕地为主，耕地面积约为 22.49 hm²，占流域面积的 50%，退耕还林政策后该流域内仍存在大量坡耕地，面积约为 6.13 hm²；流域内梁峁起伏，沟壑纵横，水土流失较为严重，尤其在暴雨条件下极易发生严重的土壤侵蚀。

2017 年 7 月 25—26 日，黄河中游无定河流域中下游遭受特大暴雨侵蚀，200.0 mm 以上的特大暴雨覆盖子洲—绥德—米脂一带，被称为“7·26”暴雨^[14]。岔巴沟流域降雨量达 211.0 mm，附近子洲站次降雨量为 206.6 mm，最大 1 h（7 月 26 日 13:00—14:00）降雨量为 52.0 mm^[15]，

最大日降雨量（26 日）达 206.9 mm。“7·26”暴雨达到 500 年一遇标准^[14]。据子洲站气象观测资料显示，“7·26”暴雨之后 3 a，研究区内又发生了多次强降雨。2018 年 6 月 18 日和 7 月 11 日分别发生一次暴雨，最大日降雨量均为 53.2 mm；2019 年发生 2 次暴雨，最大日降雨量分别为 58.6 mm（7 月 22 日）和 68.2 mm（8 月 3 日）；2020 年 8 月 5 日发生暴雨 1 次，最大日降雨量达 85.6 mm，均达到暴雨标准^[16]。上述暴雨为研究切沟发生发育提供了条件。

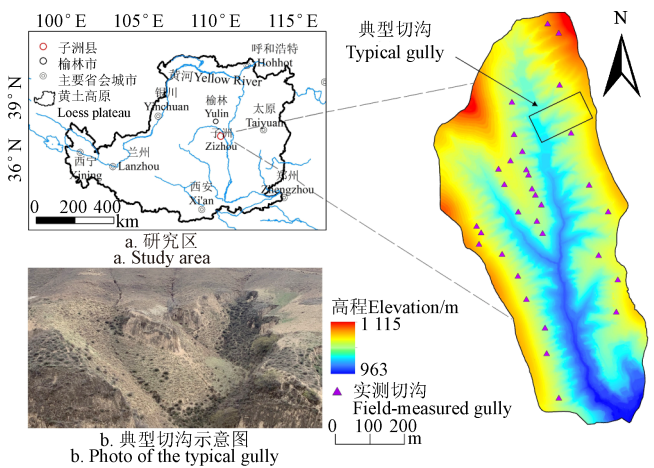


图 1 研究区及典型切沟示意图
Fig.1 Study area and photo of typical gully

1.2 数据来源

本文基础数据包括谷歌（Google Earth，GE）影像、无人机（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）影像数据、2021 年 4 月对研究区进行的土地利用调绘数据以及基于全球导航卫星系统实时动态（Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematic，GNSS-RTK）的切沟实测数据。在 2017-GE 影像获取日期（2017 年 5 月 12 日）至 2017-UAV 获取日期（2017 年 8 月 14 日）之间，除去“7.26”暴雨之外，研究区内其他日期降雨较少，仅有 7 d 的日降雨量超过 10.0 mm（表 1），无暴雨级别降雨发生，加上耕作的作用，可以认定 UAV 影像上判定的新成切沟为“7.26”暴雨所致。

表 1 GE 影像与 UAV 影像获取间隔期间降雨量

Table 1 Rainfall during the interval between GE (Google Earth) and UAV (Unmanned Aerial Vehicle) images acquisition											
日期 Date	2017-05-22	2017-06-05	2017-06-21	2017-07-06	2017-07-14	2017-07-15	2017-07-25	2017-07-26	2017-07-27	2017-07-28	2017-08-12
日降雨量 Daily rainfall/mm	10.5	22.2	11.0	11.1	44.0	15.9	12.1	206.9	16.5	18.4	14.5

表 2 所示为本研究所用影像数据详情，2017-GE 影像为 2017 年“7·26”特大暴雨前最近一期影像数据，分辨率为 0.12 m。2017-UAV 影像和 2020-UAV 影像均为小型无人机（大疆精灵 4 RTK，相机型号为 FC6310R）获取的低空航摄影像，采用 GNSS 网络连续运行参考站（Continuously Operating Reference Stations，CORS）差分方式确定照片瞬时位置，以提高精度，使用 Pix4mapper 进行空三解运算得到数字正射影像（Digital Orthophoto Map，DOM）和数字表面模型（Digital Surface Model，DSM）。三期影像均采用通用横轴墨卡托投影坐标系，

并以 2020-UAV 影像为基准，利用 ArcGIS 软件将 2017-UAV 影像进行空间配准。

表 2 数据来源及参数
Table 2 Data source and parameters

数据名称 Data name	时间 Date	获取方式 Obtaining method	分辨率 Resolution/m
2017-GE 影像	2017-05-12	Google Earth	0.12
2017-UAV 影像	2017-08-14	大疆精灵 4 RTK	0.07
2020-UAV 影像	2020-08-20	大疆精灵 4 RTK	0.04

植被的存在会影响 DSM 对真实地表的表达。研究区

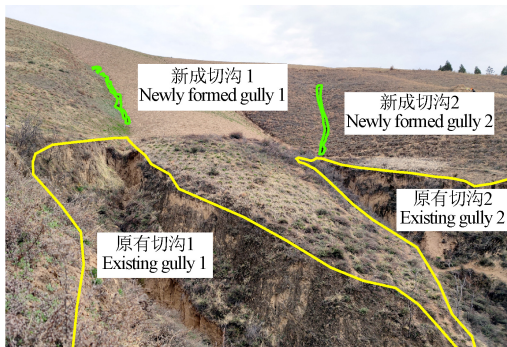
内大部分区域为草地或裸地,林地较少,因此通过以下步骤尽可能还原真实地表:1)对DSM进行高斯滤波(消除噪声和草地对数据精度的影响);2)对于存在树木、灌木的区域,获取其周边平面坐标与高程值,插值得到此区域1 m分辨率DSM;3)将其余无植被干扰或植被干扰较小处DSM重采样为1 m,并与插值后的DSM进行拼接,得到研究区1 m分辨率DSM。

1.3 切沟及其变化特征提取

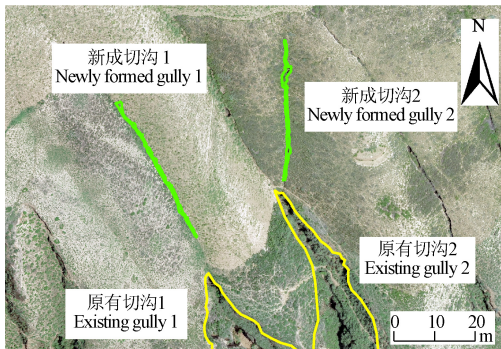
1.3.1 切沟的界定及其解译方法

切沟指普通耕作工具无法横跨且宽度和深度大于0.5 m的侵蚀沟,其纵剖面一般与所在坡面平行^[3]。将研究区的切沟分为原有切沟与新成切沟两种类型,后者根据发生位置,又分为坡面切沟、梯田切沟、道路切沟和底部切沟四类。本研究中原有切沟特指“7·26”暴雨前就存在的切沟;新成切沟特指因“7·26”暴雨一次降雨形成的切沟,一般具有细长的特点,其中的坡面切沟为发育在坡面(不含梯田)上的新成切沟;梯田切沟为切破梯田及沿梯田田面发育的新成切沟;道路切沟为道路表面发生的新成切沟;底部切沟为发育在古代沟谷底部两侧沟条、沟坪、淤地坝等位置的新成切沟,一般与沟底基本平行。

根据DOM影像的颜色、形状、阴影和纹理等特征,结合野外调查,在ArcGIS软件下对切沟进行人工目视解译,示意如图2。将2017-GE影像和2017-UAV影像进行对照,解译得到新成切沟;基于2017-UAV影像和2020-UAV影像分别解译得到两期新成切沟和原有切沟,统计得到其在2017—2020年间的动态特征。



a. 实地照片上的切沟示意
a. Gully sign in field photos



b. 无人机影像上的切沟示意
b. Gully sign in the UAV image

图2 切沟示意图

Fig.2 Diagrammatic drawing of the gully

1.3.2 切沟形态参数计算方法

本文使用ArcGIS 10.5软件对切沟形态参数进行统计。切沟长度为沟头至沟尾沿流水线投影长度(m);切沟宽度沿垂直流水线方向,使用测量工具在切沟长度的1/4、1/2和3/4处测量,取其宽度平均值为切沟宽度(m)。

1.3.3 基于UAV影像的切沟解译精度验证

2021年4月团队对王武沟小流域32条切沟采用GNSS RTK进行了野外实测,实测点位置如图1所示。将实测结果统一至与无人机资料一致的坐标系中,以实测结果为基准,评价解译结果的面积和长度精度。

解译切沟面积精度的计算^[17-18]如下:

$$I = M \cap V \quad (1)$$

$$D = I/M \times 100\% \quad (2)$$

$$E = I/V \times 100\% \quad (3)$$

$$P_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2}{\frac{1}{D_i} + \frac{1}{E_i}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 M 为实测切沟面积, m^2 ; V 为基于UAV的解译切沟面积, m^2 ; I 为实测和解译切沟交集面积, m^2 ; D 和 E 分别为 I 占实测和解译切沟面积的比例, %; N 为用于验证的切沟数量; P_v 为解译切沟面积精度。 P_v 值越接近100%,精度越高。经计算本研究中的 P_v 值达96.78%。

解译切沟长度误差的计算:由于研究区坡陡,许多切沟沟底很难到达,加上沟底起伏不平,现场较难精确判断准确沟底线位置^[19],因此切沟长度精度计算主要考虑了沟头位置的解译精度,具体步骤为:1)基于经预处理后的DSM数据利用ArcGIS中水文分析方法提取沟底线;2)分别做实测沟头点与解译沟头点至沟底线的垂线,交点作为水文调整后的实测与解译沟头点;3)计算水文调整后实测与解译沟头点沿沟底线的距离,计算水文调整后的实测点沿沟底线至沟口的长度;4)依据式(5)和式(6)计算长度误差。

$$R = d/L \times 100\% \quad (5)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (6)$$

式中 R 为解译切沟长度误差, %; d 为水文调整后实测与解译沟头点沿沟底线距离, m; L 为水文调整后实测沟头点沿沟底线至沟口的长度, m。 R 值越接近0,精度越高。 $\bar{R}$ 为切沟长度误差的平均值,经计算本研究中 $\bar{R}$ 为0.41%。可见,该小流域基于厘米级分辨率无人机影像解译切沟结果与实测相近。

1.3.4 切沟发育主要参数计算方法

切沟发育主要方式包括沟头溯源、沟壁扩张和沟底下切^[20],本文切沟发育分析主要针对沟头溯源开展,通过ArcGIS测量得到切沟前进距离,进而计算得到切沟前进速率(式(7))。

$$X = x/m \quad (7)$$

式中 X 为切沟前进速率, m/a; x 为观测期内切沟前进距离, m; m 为切沟发育观测年数,本文中 m 的取值为3 a。

此外,将发生沟头前进的切沟数量占总数量的百分

比作为沟头发育率,以衡量不同类型切沟沟头发生变化的概率(式(8))。在2017—2020年间,部分切沟被人为填平,这部分切沟不参与统计。

$$P_g = b / (N_l - N_d) \times 100\% \quad (8)$$

式中 P_g 为沟头发育率,%; b 为发生溯源侵蚀切沟总条数; N_l 为切沟总条数; N_d 为人为填平消失的切沟条数。

1.4 切沟发育相关因子提取方法

1.4.1 地形因子提取

地形作为切沟侵蚀产生的外部条件之一,对切沟发育有较大影响,其中坡度和汇水面积是切沟发生的重要地形临界条件^[21-23],因此本研究主要考虑了上述两种地形指标,分析其与切沟发育的关系。

本研究中沟头坡度指沟头所在坡面坡度,其计算步骤为:1)利用ArcGIS 3D分析工具,以沟头为起点,垂直等高线方向绘制20 m长的坡面线(坡面线长度可根据距离分水岭距离的大小而适当减小,一般不超过崩边线);2)基于2020-UAV影像DSM,以坡面线上各栅格高程为 Y ,各高程栅格距坡面线起点距离为 X ,绘制散点图,并进行线性拟合,拟合线斜率为沟头点坡度,并换算单位为度($^{\circ}$)^[23]。

沟头汇水面积的计算步骤为:1)利用ArcGIS水文分析工具,基于2020-UAV影像DSM,计算沟头汇水面积并提取汇水范围;2)结合2020-UAV影像DSM生成的等高线(1 m等高距)和DOM,以垂直等高线为基本原则,对提取的汇水范围进行人工修正,消除地表微地形影响的汇水范围误差^[23]。

1.4.2 土地利用类型划分

根据《土地利用现状分类》GB/T 21010—2017^[24],结合研究区实地情况,划分为耕地、林地、草地、住宅用地、交通运输用地和其他土地六个一级类,为进一步明确切沟发育规律,将耕地分为梯田、坡耕地和淤地坝三类,将交通运输用地分为生产道路(非硬化路面)和其他交通运输用地两类。基于2017—UAV影像DOM,根据不同地物的颜色、形状和纹理等,人工目视解译土地利用类型。并于2021年4月对研究区土地利用情况进行实地走访和野外调绘,经验证发现土地利用类型解译精度较高,可达96.34%,并依据调查情况对解译错误图斑进行修订。

1.5 数据统计与分析

采用SPSS 24.0软件对地形因子和切沟发育参数进行相关性分析;使用Origin 2021软件绘制小提琴图并进行线性回归拟合。

2 结果与分析

2.1 极端暴雨条件下切沟形态与分布特征

王武沟流域在2017年“7·26”特大暴雨中新增切沟45条,约为101条/ km^2 ,3.04 km/km^2 ,其中坡面切沟17条,梯田切沟12条,道路切沟11条,底部切沟5条。图3为坡面切沟、梯田切沟、道路切沟和底部切沟的典型示意图。坡面切沟多为细长型;梯田切沟则相对较宽,拐点较多,多呈之字形或S型;道路切沟有许多细小的分支;底部切沟多较宽。

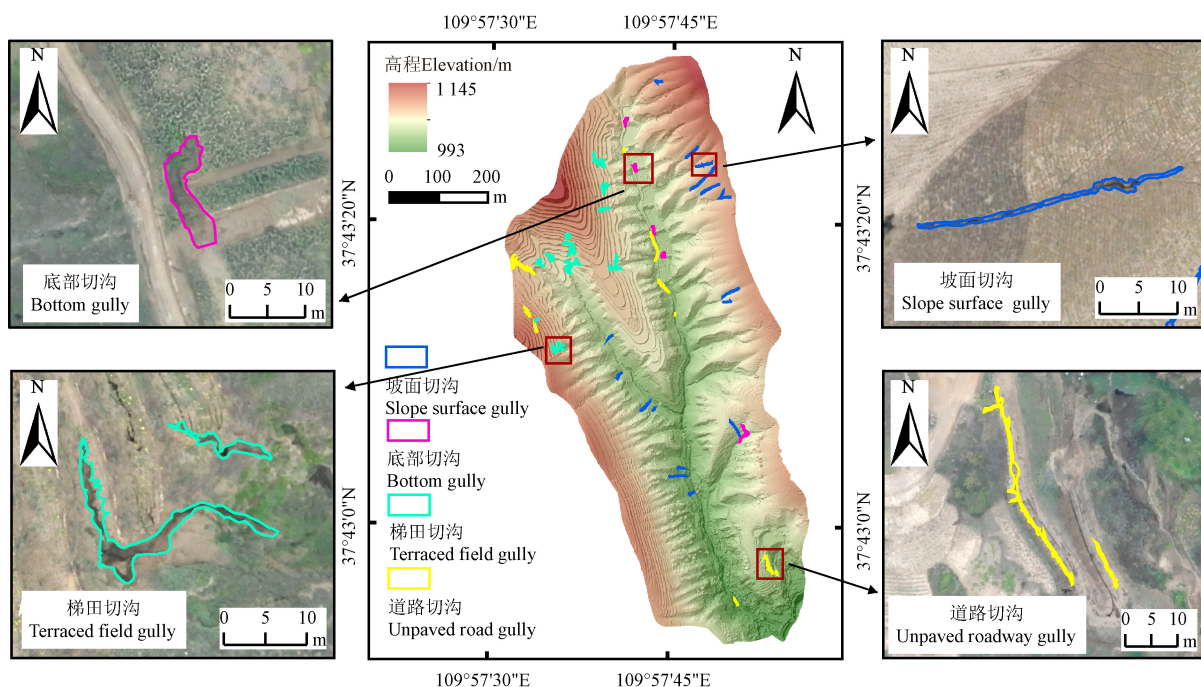


图3 2017年“7·26”特大暴雨中王武沟流域新成切沟

Fig 3 The newly formed gullies in Wangwugou Watershed during the “7·26” in 2017

新成切沟形态参数统计结果表明(图4),新成切沟的长度、宽度和面积的平均值分别为30 m、1.45 m和33.11 m^2 ,中值分别为25.63 m、1.01 m和21.13 m^2 ,

新成切沟形态参数的均值和中值表现出较大差异性。坡面切沟、梯田切沟、道路切沟和底部切沟的长度分别聚集在10~40、15~50、10~45、15~20 m之间,最大

长度出现在道路切沟, 长度可达 99.60 m, 但最小值也出现在道路切沟, 为 6.46 m。梯田切沟与底部切沟较宽, 分别集中在 1~3、2.50~3 m 之间, 最大宽度出现在底部切沟, 宽度可达 5.60 m; 而坡面切沟和道路切沟宽度均较小, 主要集中在 0.50~1 m 之间。底部切沟

和梯田切沟面积整体较大, 底部切沟面积分布较为均匀, 主要集中在 50 m² 左右, 梯田切沟面积跨度较大, 面积主要分布在 10~80 m² 之间, 面积最大达 150.10 m²; 坡面切沟和道路切沟的面积差异较小, 主要在 5~25 m² 之间。

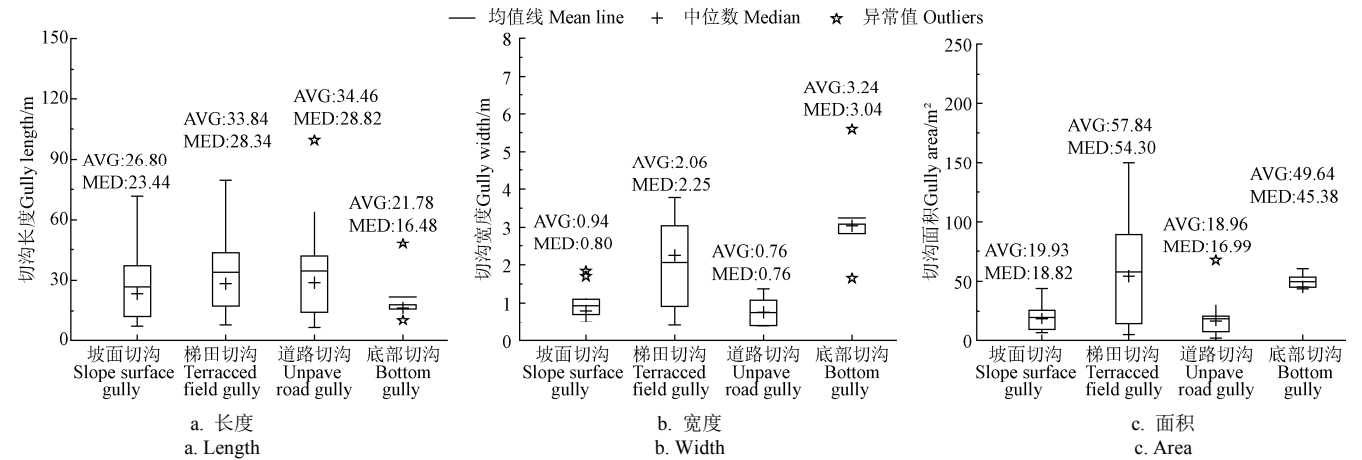


图 4 不同类型新成切沟形态特征参数
Fig 4 Morphological characteristic parameters of different types of newly formed gully

表 3 为新成切沟所在土地利用类型统计。由表 3 可知, 研究区土地利用类型以草地为主, 占流域面积的 42.98%; 其次为梯田耕地和坡耕地, 分别占流域面积的 34.51%和 13.80%; 其他土地占比最少, 仅有 0.41%。暴雨后梯田耕地形成切沟 12 条, 坡耕地 17 条, 淤地坝 4 条, 草地 1 条, 生产道路 11 条, 林地、住宅用地未发生新成切沟侵蚀。对比不同土地利用类型单位面积形成的切沟条数, 生产道路多达 1 309.52 条/km², 淤地坝和坡耕地达 388.35 和 277.32 条/km², 梯田耕地为 78.28 条/km², 草地为 5.24 条/km²。

对比不同土地利用类型单位面积形成的切沟长度, 生产道路多达 45.24 km/km²; 其次为坡耕地和淤地坝, 分别为 7.99 和 5.83 km/km²; 梯田耕地和草地较少, 分别为 2.67 和 0.05 km/km²。研究区内的生产道路相较于其他几种土地利用类型, 在极端暴雨条件下更容易形成切沟。林草对新成切沟的抑制作用非常明显, 较少发生切沟; 梯田耕地和坡耕地均为农地, 但梯田耕地的沟条密度和切沟密度均仅为坡耕地的 1/3, 表明梯田作为一种水土保持措施, 其在暴雨时抑制切沟发生方面发挥了较好的作用。

表 3 新成切沟发育的土地利用类型
Table 3 The land use type of the newly formed gully

土地利用类型 Land use type	面积 Area/hm ²	面积占比 proportion/%	新成切沟数 Number of newly formed gullies/条	新成切沟总长度 Length of newly formed gullies/km	沟数密度 Number density of gullies/(条·km ⁻²)	长度密度 Length density of gullies /(km·km ⁻²)
梯田耕地 Terrace cropland	15.33	34.51	12	0.41	78.28	2.67
坡耕地 Slope cropland	6.13	13.80	17	0.49	277.32	7.99
淤地坝 Check dam cropland	1.03	2.32	4	0.06	388.35	5.83
林地 Forest	1.54	3.47	0	0	0	0
草地 Grassland	19.09	42.98	1	0.01	5.24	0.05
住宅用地 Residential land	0.28	0.63	0	0	0	0
生产道路 Unpaved road	0.84	1.89	11	0.38	1 309.52	45.24
其他土地 Other land	0.18	0.41	0	0	0	0
所有土地利用类型 All land use types	44.42	100	45	1.35	101.31	3.04

2.2 新成切沟与原有切沟发育对比

表 4 为 2017 年 8 月—2020 年 8 月 3 a 期间研究区内切沟发育相关参数统计表。由表 4 可知, 研究区内原有切沟共有 84 条, 有 22 条沟头继续发展, 沟头发育率为 26.19%; 新成切沟共有 45 条, 其中 16 条被人为填平, 剩余 29 条中有 10 条新成切沟沟头继续前进, 沟头发育率为 34.48%, 是原有切沟的 1.32 倍。在暴雨之后的 3 a 中, 相比原有切沟, 新成切沟沟头溯源侵蚀的概率更大。

表 4 切沟沟头发育情况
Table 4 The development of gully heads

类型 Type	切沟总数 Total number of gullies/条	人为填平切沟数 Number of artificially filled gullies/条	变化切沟数 Number of changed gullies/条	沟头发育率 Development rate of gully head/%
新成切沟 Newly formed gully	45	16	10	34.48
原有切沟 Existing gully	84	0	22	26.19

根据图 5 可知, 新成切沟是原有切沟前进速率均值

的3倍左右,它们的均值分别为0.58和0.19 m/a。并且,新成切沟沟头前进速率普遍大于0.15 m/a,主要在0.15~0.80 m/a之间,分布较为离散;原有切沟沟头前进速率普遍小于0.20 m/a,分布较为集中。这表明新成切沟沟头前进速率较快、差异性较大,原有切沟沟头相对稳定,沟头前进距离差异性也较小。

2.3 切沟发育与地形参数关系分析

2017年—2020年切沟沟头前进速率与地形因子的关系(图6)表明,沟头所在坡面坡度与新成切沟和原有切沟沟头前进速率间相关性均不显著($P>0.05$);而沟头汇水面积与新成切沟前进速率呈显著性正相关关系($P<0.05$),与原有切沟也呈显著性正相关关系($P<0.01$)。新成切沟和原有切沟沟头坡度与切沟沟头前进速率回归模型的 R^2 分别仅为0.06和0.09;新成切沟和原有切沟沟头汇水面积与切沟沟头前进速率的 R^2 分别为0.58和0.31。新成切沟沟头前进速率与地形因子的拟合效果优于

原有切沟;沟头汇水面积与沟头前进速率的拟合效果优于沟头所在坡面坡度。沟头汇水面积增大显著促进切沟沟头发育,并且能较好地模拟切沟沟头前进速率。

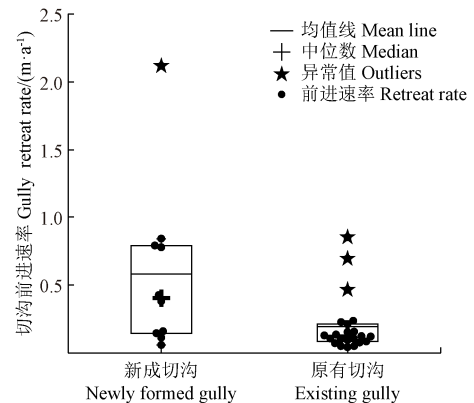


图5 切沟前进速率
Fig.5 Head retreat rate of gully

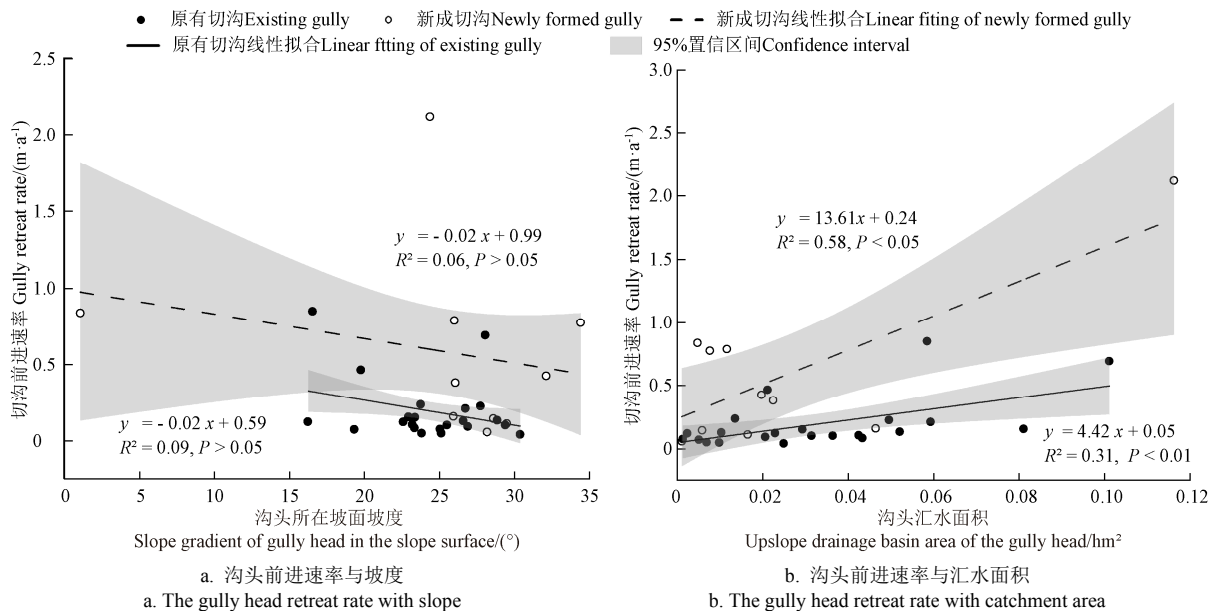


图6 切沟前进速率与地形因子的线性回归
Fig.6 Linear regression of gully head retreat rate and topographic factors

3 讨论

本文的研究结果表明暴雨条件下新成切沟问题极其严峻。本研究发现陕北“7·26”暴雨每平方公里就可产生约101条新成切沟,其中坡面新成切沟可达38.27条/ km^2 (即坡面切沟数(17条)与流域面积0.4442 km^2 的比值),这一结果与文献[25]在“7·26”暴雨后对岔巴沟坡面新成切沟的调查结果48.90条/ km^2 较为接近。坡面、梯田和底部切沟的平均深度为1.06 m,这与陈卓鑫等[5]在该场暴雨中对坡面新成切沟实地测量的平均深度1.10 m相似,并且有20%以上的新成切沟宽度和深度在2 m以上。Zhang等[26]在同场暴雨中对岔巴沟流域道路切沟实地测量得出的深度均值3.22 m,参考以上道路切沟深度值,并在ArcGIS软件中基于厘米级无人机DSM对其他类型新成切沟深度进行量测,计算研究区总侵蚀体积达到1967.74 m^3 ,按生产道路容重1.44 g/cm^3 [26],其他部位容

重1.35 g/cm^3 估算,切沟侵蚀量达6162.08 t/km^2 ,对土地破坏非常严重。而同场暴雨中岔巴沟平均细沟侵蚀量为1748.00 t/km^2 [25],仅是新成切沟侵蚀量的28.37%。近年来全球极端暴雨增加为全球土壤侵蚀带来新的挑战[27],应进一步重视新成切沟侵蚀问题。

水土保持措施在减少新成切沟发生方面发挥了重要的作用。林草措施减小了洪峰流量和水流速度,降低切沟形成的降雨阈值[11],是非常重要的水土保持措施[28];梯田使坡度变缓、坡长变短,从而减小了水流能量[29]。从本研究结果来看,坡耕地新成切沟条数达到277.32条/ km^2 ,而林草坡面仅为5.24条/ km^2 ,相比坡耕地减少了98.11%;梯田为78.28条/ km^2 ,相比坡耕地减少了71.77%。梯田和林草除了减少其所在坡面沟蚀外,还对其下游沟蚀产生重要影响。如在2019年山东临朐特大暴雨中,相比汇水区主要为坡耕地的道路,汇水区为林草和梯田的道路沟蚀量分别减少了47%和85%[13]。虽然水土保持措施效

果已初步显现,但在特大暴雨考验中仍存在很多问题亟需解决。如部分梯田田面上发育面积较大的切沟,在田坎脆弱处切破田坎,形成的切沟相比坡耕地上的更宽;另外在沟底的淤地坝发生了宽达 5 m 深达 3 m 以上的切沟并损毁坝体,造成了严重的工程措施损毁。生产道路非常容易发生侵蚀^[25],研究区内大部分生产道路未修建排水渠,暴雨时道路直接作为排水路线,径流冲刷导致许多道路发生切沟,道路切沟一般很快填平,但容易造成反复侵蚀^[30]。在极端暴雨条件下,梯田、淤地坝和生产道路的维护、功能的保持已成为目前黄土高原高质量发展中面临的重要问题之一。

研究区内的切沟在暴雨之后的发育情况不同。新成切沟的沟头平均前进速率为 0.58 m/a,原有切沟的沟头前进速率仅为 0.19 m/a,新成切沟是原有切沟沟头前进速率的约 3 倍。小流域内原有切沟沟头一般已形成植被保护,较为稳定,而新成切沟缺少植被保护,这可能是其发育较为迅速的原因。已有对切沟发育速率的研究多是将新成切沟和原有切沟一起统计与分析,如杨力华等^[8]研究发现在绥德韭园沟近 50 年切沟沟头前进速率为 0.30 m/a;在李镇等^[31]研究中,同在黄土区的晋西,2003—2010 年切沟沟头前进速率为 0.33~0.44 m/a;本研究中原有切沟的沟头前进速率略小,仅为 0.19 m/a,这可能与去除了新成切沟的发生、发育有关。通过本研究中新成切沟和原有切沟发育情况的对比,可以得出在进一步切沟治理中,要尤其重视近年来新成切沟这一重要类型。

本研究表明汇水面积是影响切沟动态的重要的地形因素,这与很多研究认识一致^[10,13,32]。汇水面积增大时,地表汇集径流量增多,导致径流速度与径流动能增加,径流冲刷能力变强,促进切沟的发育。因此,新成切沟的治理应着重采用有效措施减小汇水面积。坡度也是影响切沟发育的重要因素,在本研究中切沟沟头发育速率与坡度呈不显著负相关关系,黄婷婷等^[33]的研究也表明为负相关。径流流速一般随坡度增加而增大,从而增加侵蚀,而坡度与切沟发育呈不显著负相关关系的可能原因是研究区内坡度与植被覆盖度的共线性。植被可以减少雨滴下落的动能和径流作用,同时植被根系还能增强土壤的抗蚀性^[34-35]。本研究中切沟沟头所在坡面坡度与植被覆盖度呈显著性正相关关系($P<0.01$),相关系数达到 0.49,在植被对切沟发育的抑制作用下,坡度的增加对切沟发育的影响被削减。

退耕还林(草)及梯田、淤地坝工程的实施大幅改善了黄土高原的侵蚀状况,但随着极端气候事件的增加,水土保持工作面临新的挑战,沟蚀的防治尤其是新成切沟的预防是其中一个重要问题,进一步研究中亟需明确新成切沟对梯田、淤地坝等工程措施的损害风险,新成切沟多尺度发生发育规律和多驱动影响因子及其共同作用机制,构建更为有效的预测模型,并提出切实可行的防治技术。

4 结 论

本文基于高分辨率无人机影像对极端暴雨中岔巴沟子流域王武沟新成切沟发生规律进行了研究,对比了之后 3 a 新成切沟与原有切沟的发育,探索了切沟动态发育与地形因子的关系,结果显示:

1) 在极端暴雨情况下新成切沟问题严峻,可达 101 条/km²,不同类型新成切沟形态差异较大,切沟在生产道路、淤地坝和坡耕地最易发生,梯田和林草较好地抵御了切沟的形成。

2) 新成切沟在形成之后的 3 a 内沟头进一步发育的概率和沟头前进速率更大,分别为原有切沟的 1.32 倍和 3 倍。

3) 新成切沟和原有切沟沟头发育均与汇水面积呈显著性正相关。

[参 考 文 献]

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近 70 年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1659-1696.
Chen Fahu, Fu Bojie, Xia Jun, et al. Major advance in studies of physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(11): 1659-1696. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘宝元, 杨扬, 陆绍娟. 几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 9-16.
Liu Baoyuan, Yang Yang, Lu Shaojuan. Discrimination on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48-59, 116.
Zheng Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion process research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48-59, 116. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈卓鑫, 王文龙, 康宏亮, 等. 特大暴雨下不同土地利用类型坡面切沟发育特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 77-84.
Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Gully development characteristics of the slopes for different land-use types under extreme rainstorms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 77-84. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张皎, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 89-94.
Zhang Jiao, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Methodology of dynamic monitoring gully erosion process using 3D laser scanning technology[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 89-94. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王雷, 龙永清, 徐佳, 等. 黄土侵蚀沟稳定性监测与初步分析[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 119-122.

- Wang Lei, Long Yongqing, Xu Jia, et al. The monitoring and preliminary analysis of the stability of erosion gullies in Loess Plateau[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(1): 119-122. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨力华, 庞国伟, 杨勤科, 等. 近 50 年来王茂沟流域侵蚀沟变化及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 64-70.
- Yang Lihua, Pang Guowei, Yang Qinke, et al. Changes and influencing factors of erosion gully in Wangmaogou Watershed in the last 50 Years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 64-70. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈一先, 焦菊英, 魏艳红, 等. 陕北黄土区退耕前 1976—1997 坡面切沟发育特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 120-127.
- Chen Yixian, Jiao Juying, Wei Yanhong, et al. Characteristics of gully development in Northern Shaanxi Hilly Loess Region before Grain-for-Green Programme (1976-1997)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(17): 120-127. (in Chinese with English abstract)
- [10] Guan Y B, Yang S T, Zhao C S, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205:104800.
- [11] Yuan M T, Zhang Y, Zhao Y Y, et al. Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739:140066.
- [12] 王颢霖, 焦菊英, 唐柄哲, 等. 陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 122-130.
- Wang Haolin, Jiao Juying, Tang Bingzhe, et al. Characteristics of rill erosion and its influencing factors inslope farmland after “7. 26” rainstorm in Zizhou County, Shaanxi Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(11): 122-130. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wang C M, Liu B Y, Yang Q K, et al. Unpaved road erosion after heavy storms in mountain areas of northern China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 10(1): 29-37.
- [14] 刘宝元, 刘晓燕, 杨勤科, 等. 黄土高原小流域水土流失综合治理抗暴雨能力考察报告[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 2, 349-350.
- [15] 王楠, 陈一先, 白雷超, 等. 陕北子洲县“7·26”特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 338-344, 347-348.
- Wang Nan, Chen Yixian, Bai Leichao, et al. Investigation on soil erosion in small watersheds under “7. 26” Extreme rainstorm in Zizhou County, Northern Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 338-344, 347-348. (in Chinese with English abstract)
- [16] 中国气象局. 降水量等级: GB/T 28592-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [17] Arabameri A, Pradhan B, Pourghasemi H R, et al. Spatial modelling of gully erosion using GIS and R programing: A comparison among three data mining algorithms[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8):1369.
- [18] Nampak H, Pradhan B, Mojaddadi H, et al. Assessment of land cover and land use change impact on soil loss in a tropical catchment by using multitemporal SPOT - 5 satellite images and Revised Universal Soil Loss Equation model[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3440-3455.
- [19] 赵春敬, 焦菊英, 税军锋, 等. 西藏中南部侵蚀沟形态无人机航测与传统地面测量的对比分析[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 120-127.
- Zhao Chunjing, Jiao Juying, Shui Junfeng, et al. Comparative analysis on morphological characteristics of erosion gullies measured by an unmanned aerial vehicle and traditional ground survey in South Central Tibet[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 120-127. (in Chinese with English abstract)
- [20] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. *地理科学*, 1986, (4): 340-347.
- [21] Torri D, Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 73-85.
- [22] 李斌兵, 郑粉莉, 张鹏. 黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 16-20.
- Li Binbing, Zheng Fenli, Zhang Peng. Geomorphic threshold determination for ephemeral gully and gully erosion areas in the Loess Hilly Gully Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(5): 16-20. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘欣, 王春梅, 庞国伟, 等. 基于坡度—汇水面积关系的黄土浅沟与切沟沟头形成敏感区模拟[J]. *山地学报*, 2020, 38(5): 658-667.
- Liu Xin, Wang Chunmei, Pang Guowei, et al. Sensitive area simulation of ephemeral and permanent gully based on slope-area relationship in the Loess Region[J]. *Mountain Research*, 2020, 38(5): 658-667. (in Chinese with English abstract)
- [24] 自然资源部(国土). 土地利用现状分类: GB/T 21010-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [25] 刘宝元. 黄土高原“7·26”特大暴雨洪水与水土保持效益综合考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [26] Zhang Y, Zhao Y Y, Liu B Y, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 284:106580.
- [27] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 94-117.
- [28] Chen H, Zhang X P, Abila M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 170: 141-149.
- [29] Fu S H, Yang Y F, Liu B Y, et al. Peak flow rate response to vegetation and terraces under extreme rainstorms[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 288:106714.
- [30] Zhao Y Y, Zhang Y, Yuan M T, et al. Estimation of initiation thresholds and soil loss from gully erosion on unpaved roads on China's Loess Plateau[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(9): 1713-1724.
- [31] 李镇, 张岩, 姚文俊, 等. 基于 QuickBird 影像估算晋西黄土区切沟发育速率[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 141-148.
- Li Zhen, Zhang Yan, Yao Wenjun, et al. Estimating gully development rates in Hilly Loess Region of Western Shanxi

- province based on QuickBird images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 141-148. (in Chinese with English abstract)
- [32] Yang S T, Guan Y B, Zhao C S, et al. Determining the influence of catchment area on intensity of gully erosion using high-resolution aerial imagery: A 40-year case study from the Loess Plateau, northern China[J]. Geoderma, 2019, 347: 90-102.
- [33] 黄婷婷, 杨扬, 史扬子, 等. 基于 WorldView-2 影像估算黄土高原六道沟小流域退耕还林(草)后的切沟发育速率[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(1): 1-10.
- Huang Tingting, Yang Yang, Shi Yangzi, et al. Using WorldView-2 images to estimate gully development of the Liudaogou catchment in the Loess Plateau after the Grain for Green project[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [34] Tang H W, Wang H, Liang D F, et al. Incipient motion of sediment in the presence of emergent rigid vegetation[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2013, 7(3): 202-208.
- [35] 肖培青, 姚文艺, 王国庆, 等. 植被作用下土壤抗剪强度和径流侵蚀力的耦合效应[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 224-230.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Wang Guoqing, et al. Effects of soil shear strength and runoff erosivity on slopes with different vegetation cover[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 224-230. (in Chinese with English abstract)

Occurrence and development of newly formed gullies under extreme rainstorm conditions using remote sensing images

Yang Lijuan^{1,3}, Wang Chunmei^{1,2,3*}, Zhang Chunmei^{1,3}, Pang Guowei^{1,3}, Long Yongqing^{1,3}, Wang Lei^{1,3}, Liu Baoyuan⁴, Yang Qinke^{1,3}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of Ecohydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China; 4. Advanced Institute of Natural Science, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

Abstract: Soil erosion has posed some serious damage on the land resources in the world. The "Grain for Green" project in 1999 has been launched to restore the vegetation on the steep slope farmlands and control the soil and water loss for a better ecological environment of the Loess Plateau in China. But, the frequent extreme rainstorms have aggravated the occurrence and development of gully erosion under global warming in recent years. The development of the gullies after the extreme rainstorm still remains unclear so far. Fortunately, the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) data can be collected fast, accurately, and efficiently after a rainstorm. The flexible acquisition time of UAVs can be expected to serve as an effective tool for the development of gully. Taking the Wangwugou Small Watershed of Chabagou Watershed on the Loess Plateau as the research area, this study aims to investigate the formation and development of gully under a rainstorm using UAV images. A case study selected the "7·26" extreme rainfall that occurred in Northern Shaanxi of China on July 26, 2017, with a daily rainfall of 206.6 mm. The patterns of newly formed gullies were captured under the climate. An equation with the topographic parameters was established for the occurrence and development of newly formed gullies in the following three years. The results showed that: 1) There were 45 newly formed gullies during the extreme rainstorm, which were about 101 gully/km² in total. Four types were divided, including the hill slope, terraced field, unpaved roadway, and bottom gullies. There were more gullies found on the sloping hills. The bottom and terraced field gullies presented much wider and larger in the study area. The unpaved roads, check dam farmland, and sloping farmland were more prone to the gullies. 2) In the three years after the formation of the new gullies, the development of the new gully heads was faster than that of the original, 34.48% of which were further advanced, indicating 1.32 times the original. The average gully head retreat rate of newly formed gullies was three times that of the original, up to 0.58 m/a, where the maximum speed reached 2.12 m/a. 3) The drainage area significantly promoted the development of gully heads. A critical topographic index was selected to simulate the retreat rate of gully heads. There was more severe soil erosion under extreme rainfall conditions. The source of newly formed gullies was rapidly traced within three years after the occurrence. Therefore, the appropriate management can be attached to prevent such gullies during this time. This finding can provide an essential reference to estimate the rill erosion on the different types of sloping land in the hilly area of Loess Plateau.

Keywords: remote sensing; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); topography; Loess Plateau; extreme rainstorm; gully