黄土高原丘陵沟壑区浅沟对切沟发生和发育的影响

王 强，王春梅※，庞国伟，龙永清，王 雷，
申华珍，杨丽娟，杨勤科

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，西安 710127；
2. 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）

摘 要：浅沟和切沟是侵蚀沟的重要组成部分，二者之间是否存在较为明显的关联性，成为新时期黄土高原沟道侵蚀治理的关键问题之一。为探究黄土高原切沟沟头上方浅沟对其下方连通的切沟发生、发育的影响，该研究在陕西子洲岔巴沟流域上、中、下游各选 1 个典型小流域为研究区，基于厘米级无人机航摄和高精度野外实测，系统分析黄土高原丘陵沟壑区浅沟与切沟连通性现状及这一连通性对切沟在极端暴雨情景下新成和之后 3 a 时间尺度发育的影响。结果表明：1）在极端暴雨情景下，有浅沟的坡面更有利于切沟的发生，3 个小流域在陕北 2017 年“7.26”极端暴雨中共发生 43 条新成切沟，其中 67.44% 与浅沟连通。2）切沟沟头上方是否存在浅沟对切沟形态特征具有重要影响，和浅沟连通的切沟长度显著大于和浅沟不连通的切沟，在切沟宽度上这一影响不显著。3）切沟沟头上方浅沟对其下方连通的切沟发育也有显著的影响。在 2017 年“7.26”暴雨后 3 a 时间尺度上，相比与浅沟不连通的切沟，与浅沟连通的切沟在后续发展过程更加活跃。有浅沟连通条件下沟头发育的新成切沟和原有切沟的占比分别是无浅沟连通的 1.67 倍和 3.11 倍，沟头前进速率分别是其 1.80 倍和 2.17 倍。该研究可为黄土高原丘陵沟壑区沟道侵蚀精准治理提供理论依据。

关键词：遥感；无人机；切沟；浅沟；黄土高原；连通性
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202304248
中图分类号：S157.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-6819(2023)-21-0079-09

王强，王春梅，庞国伟，等. 黄土高原丘陵沟壑区浅沟对切沟发生和发育的影响[J]. **农业工程学报**，2023，39(21)：79-87. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304248 http://www.tcsae.org
WANG Qiang, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. Influence of ephemeral gullies on the occurrence and development of permanent gullies in the Loess Hilly Gully Region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(21): 79-87. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304248 http://www.tcsae.org

0 引 言

黄土高原是中国乃至世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一[1]，土壤侵蚀造成严重的水土流失导致其生态和粮食安全受到威胁[2]。沟道侵蚀是黄土高原土壤侵蚀的重要表现形式，浅沟和切沟是坡面沟蚀系统的主要组成部分[3]，也是黄土高原侵蚀产沙的主要来源[4]。侵蚀沟的发生、发育规律是黄土高原水土流失治理的关键问题之一。切沟沟头是否有浅沟连通，对于其发生、发育有较大影响，定量分析这一影响有助于推进黄土高原沟道侵蚀精准治理，对于黄土高原可持续发展具有重要意义。

切沟（permanent gully，PG）指在暴雨或者融雪期间，由地表径流侵蚀形成的不能被普通耕作消除的沟道[3,5-6]，由切沟侵蚀产生的泥沙占整个黄土高原丘陵沟壑区总产沙量的 52%～70%[7]。浅沟（ephemeral gully，EG）是指在坡面上能被普通耕作工具横跨但不能被完全消除的侵蚀沟[6,8]。在黄土高原，浅沟发生一般伴随着瓦背状地形的形成[9]。随着沟蚀监测技术的发展，许多学者对黄土高原切沟发生、发育开展了大量研究。在切沟发生方面，苏建华等[10]基于 Google Earth 影像采用系统抽样的方式研究了黄土高原切沟的空间分布情况，结果表明黄土高原切沟主要沿 400 mm 等降水量线分布；赵宇辉等[11]以晋西黄土区吉县蔡家川小流域为对象探讨黄土高原小流域内切沟的空间分布特征，结果表明切沟数量、密度、频度和规模均随坡度增加呈现先增大后减小的趋势；李斌兵等[12]通过实测数据并结合地理信息系统（geographic information system，GIS）空间分析与统计回归方法，建立了适用于黄土高原丘陵区的切沟侵蚀临界模型。在切沟发育方面，李镇等[13]基于 QuickBird 影像估算了晋西黄土区切沟发育速率，结果表明切沟发育速率受林草地覆盖率的影响；黄婷婷等[14]基于 WorldView-2 影像探讨黄土高原六道沟小流域退耕还林（草）后切沟发育速率的影响因素，结果表明六道沟小流域切沟发育速率与汇水区平均坡长和平均剖面曲率呈显著正相关；

收稿日期：2023-04-29 修订日期：2023-11-07
基金项目：国家自然科学基金项目（41977062）；黄河水科学研究联合基金项目（U2243213）
作者简介：王强，研究方向为土壤侵蚀空间分异。
Email：wangqiang666@stumail.nwu.edu.cn
※通信作者：王春梅，博士，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

张岩等[15]基于 QuickBird 遥感影像，在陕西绥德县选取了 32 个小流域，分析了水平条带对切沟发展的影响，结果表明水平条带面积比例和切沟发展呈显著的负相关。但是目前针对切沟发生、发育的研究大多未将浅沟和切沟联系起来，对于浅沟连通性是否会对切沟的发生、发育产生影响的定量化认识不足，这阻碍了黄土高原沟蚀的系统治理。

2017 年 7 月 25—26 日，陕北榆林地区突降一场五百年一遇的特大暴雨[16]，暴雨主要集中在子洲、绥德、米脂一带，这次强降雨被称为“7.26”暴雨，这为系统、定量地研究浅沟连通性对切沟发生、发育的影响提供了机会。本研究在岔巴沟流域上、中、下游各选 1 个典型小流域，基于高分辨率影像和实地调查，分析浅沟连通对其下方切沟在上述暴雨中的新成以及暴雨后 3 a 时间尺度发育的影响，以期在进一步的黄河流域高质量发展中为黄土切沟精准治理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究在岔巴沟流域上、中、下游各选择一个典型小流域作为研究区（图 1 和图 2）。

岔巴沟流域（109°46′58″E～110°2′39″E，37°37′33″N～37°47′58″N）位于陕西省北部子洲县境内，是黄河十大支流之一无定河的二级支流，属于黄土丘陵沟壑区第Ⅰ副区，流域面积约 205.00 km^2，整体地势西北高、东南低。

岔巴沟流域属于温带大陆性季风气候，年降雨在时间上分配不均，主要集中在夏季且多为强度较大而历时短暂的暴雨，年平均降雨量为 470 mm；岔巴沟流域为典型的黄土地貌景观，土壤以黄绵土为主，流域内地形破碎、植被稀少，沟壑纵横，水土流失严重[17]，是沟蚀发生发育的典型黄土流域，发育有大量的浅沟和切沟。3 个典型小流域基本信息见表 1。

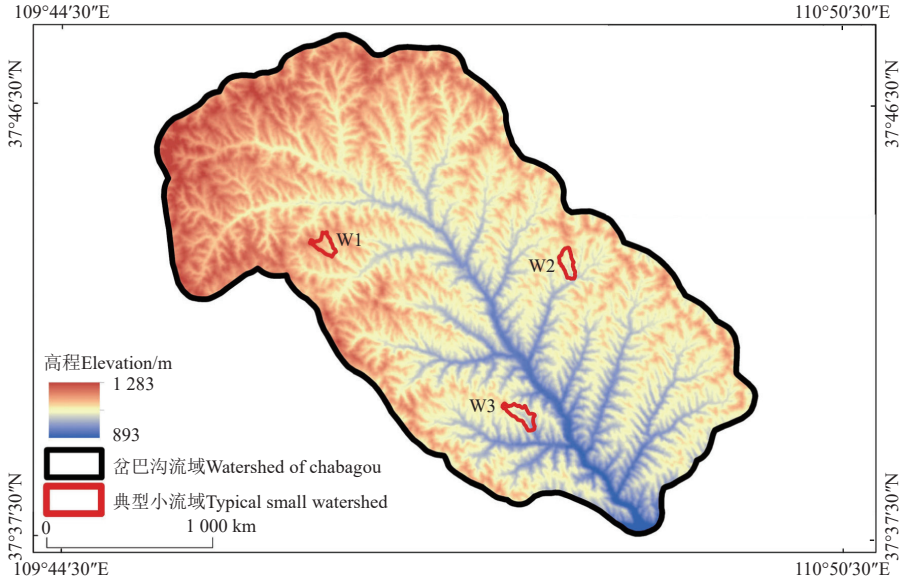


图 1 研究区位置

Fig.1 The location of the study area

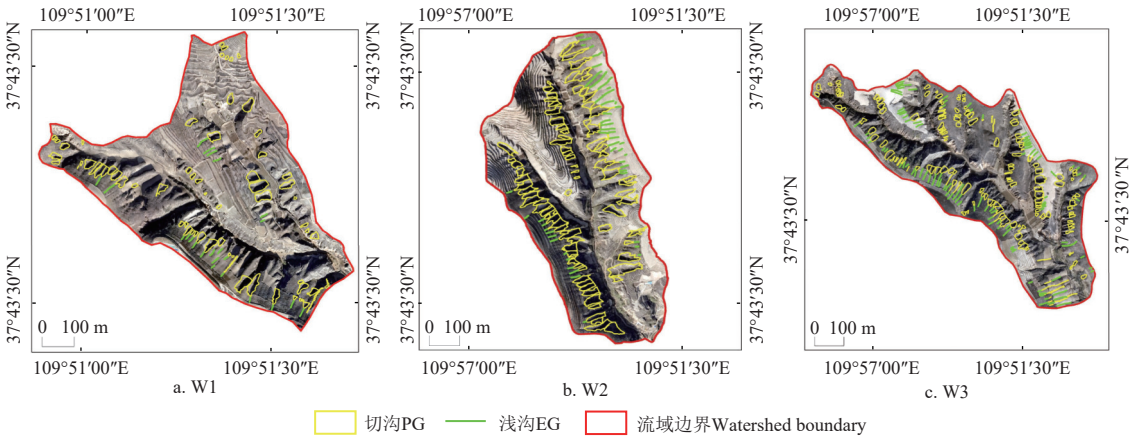


图 2 流域浅沟和切沟分布情况

Fig.2 The distribution of ephemeral gullies(EG) and permanent gullis (PG) in watersheds

表 1　三个典型小流域基本信息

Table 1　Basic information of the three small watersheds

小流域 Small watershed	所在位置 Location	面积 Area/km^2	平均坡度 Average slope/(°)	流域高差 Height difference of watershed/m	主要土地利用类型 Main land use types
W1	岔巴沟上游	0.42	24.91	156.61	草地、梯田、坡耕地
W2	岔巴沟中游	0.44	20.13	151.86	草地、梯田、坡耕地
W3	岔巴沟下游	0.57	30.10	203.55	草地、坡耕地

1.2　基础数据与预处理

本研究的基础数据包括无人机航摄影像、Google Earth 影像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）野外实测的浅沟和切沟数据。近几年来随着高分辨率遥感影像的发展，为侵蚀沟的调查提供了新的思路和数据来源[9-10,13-15,18]，由于暴雨事件的突发性，研究区所在位置并无“7.26”暴雨前的无人机影像，受数据的限制因此使用 Google Earth 影像作为补充数据。其中无人机影像用于浅沟、切沟参数及土地利用的解译，Google Earth 影像用于结合无人机影像判断新成切沟的辅助数据，野外实测的浅沟和切沟数据用于进行浅沟和切沟解译精度的验证。

1.3　浅沟、切沟的解译及形态参数计算

根据浅沟、切沟的定义和特征，基于 2017 年 8 月和 2020 年 8 月两期无人机数字正射影像（digital orthophoto map，DOM），在 ArcGIS 软件下分别对浅沟和切沟进行人工目视解译，生成浅沟线状图层和切沟面状图层。根据本研究的内容，将切沟划分为新成切沟和原有切沟。根据新成切沟发生位置可以划分为坡面切沟、梯田切沟、道路切沟和底部切沟[18]，本研究中的新成切沟特指“7.26”暴雨下新成的坡面切沟；原有切沟指在“7.26”暴雨之前就存在的切沟。在此基础上，根据切沟沟头上方是否存在浅沟，将切沟进一步划分为与浅沟连通和不连通的切沟。

本研究中使用 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；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；切沟面积为解译的沟缘线围成的面积。

为了验证无人机影像浅沟和切沟解译的精度，研究团队分别在 2020 年 8 月和 2021 年 4 月在岔巴沟典型小流域使用 GNSS RTK 开展了野外实测。基于实测的 45 条浅沟结果，在亚米级的 Google Earth 影像上通过目视解译的浅沟长度精度可达 95.01%[9]，这表明基于亚米级的 Google Earth 影像可以较为准确地判断黄土浅沟存在与否，而本研究使用的无人机影像分辨率更高为厘米级，可用于浅沟的解译。基于实测的 32 条切沟结果，对解译切沟的面积和长度精度进行了评价。结果表明在厘米级的无人机影像上切沟解译的面积和长度精度分别可达 96.78% 和 99.59%[18]，这表明基于无人机影像解译的切沟与实地也较为符合。

1.4　浅沟连通性对切沟发生和发育影响分析方法

本研究中浅沟连通性对切沟的影响主要是从切沟的在特大暴雨中的发生和之后 3 a 尺度上切沟发育两个方面开展。在浅沟连通性对切沟发生的影响方面，通过“7.26”暴雨中形成的新成切沟与浅沟的连通性进行统计，由此评估浅沟连通性对切沟发生的影响。

在浅沟连通性对切沟发育的影响方面，通过对 2017 年“7.26”暴雨之后 3 a 切沟发育情况进行统计，在此基础上分析与浅沟连通的切沟和不连通的切沟在切沟发育上的差别，由此评估浅沟连通性对切沟发育的影响。切沟发育包括沟头形成、沟头溯源、沟壁扩张和沟底下切 4 个过程[19]。在本研究中对于切沟发育的分析主要是对 2017 年“7.26”暴雨之后 3 a 对切沟的沟头溯源侵蚀进行分析。沟头溯源侵蚀主要包括沟头前进距离、前进面积和前进体积 3 个方面[20]，本文切沟沟头溯源侵蚀的研究主要针对沟头前进距离开展。通过 ArcGIS 对研究区 2017 年 8 月和 2020 年 8 月两期无人机影像解译的切沟进行叠加分析可得到切沟沟头的变化部分，通过测量得到切沟沟头的前进距离，进而计算得到切沟的前进速率（式（1））。

$$X_L = L/M \tag{1}$$

式中 X_L 为观测期内切沟的前进速率，m/a；L 为观测期内切沟沟头前进距离，m；M 表示观测年限，本文的观测年限为 3 a。将沟头发生变化的切沟数量占所有切沟数量的比例作为沟头发育的切沟占比（式（2））。

$$P_g = b/(N_l - N_d) \times 100\% \tag{2}$$

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

1.5　土地利用类型划分

本研究根据无人机影像上地物的形态、大小、色调以及纹理等特征判断土地利用类型，并参考《土地利用现状分类》GB/T21010-2017[21]，将研究区的土地利用划分为耕地、草地、林地、住宅用地、交通运输用地和其他土地 6 个一级类。为进一步研究切沟发育规律，将耕地划分为坡耕地、梯田耕地和坝地三类，将交通运输用地分为生产道路和其他交通运输用地两类。基于无人机影像，根据不同地物的形状、纹理和颜色等，人工目视解译土地利用类型。

2　结果与分析

2.1　浅沟对新成切沟发生的影响

2017 年 7 月 25—26 日，陕北无定河流域中下游遭受特大暴雨侵蚀，此次暴雨造成了严重的土壤侵蚀，3 个小流域在此次暴雨中生成了 43 条新成切沟（图 3），条数密度约为 30.56 条/km^2，长度密度约为 0.67 km/km^2。

表 2 为坡面上新成的切沟与浅沟的连通情况。在 43

条新成切沟中，有 29 条与浅沟连通，有 14 条与浅沟不连通，分别占总数的 67.44% 和 32.56%。其中坡耕地上的 38 条新成切沟有 26 条与浅沟连通，草地上的 5 条新成切沟有 3 条与浅沟连通。

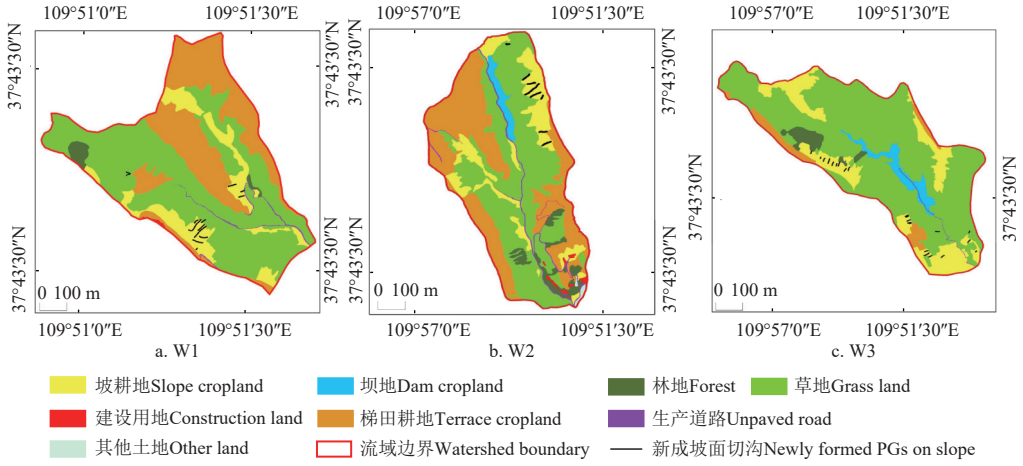


图 3 流域土地利用及 2017 年“7.26”暴雨新成坡面切沟分布

Fig.3 Land use and the distribution of newly formed PGs on slope in watersheds in 2017 ' 7.26 ' rainstorm

表 2 坡面上形成的新成切沟基本情况

Table 2 Basic situation of newly formed PGs

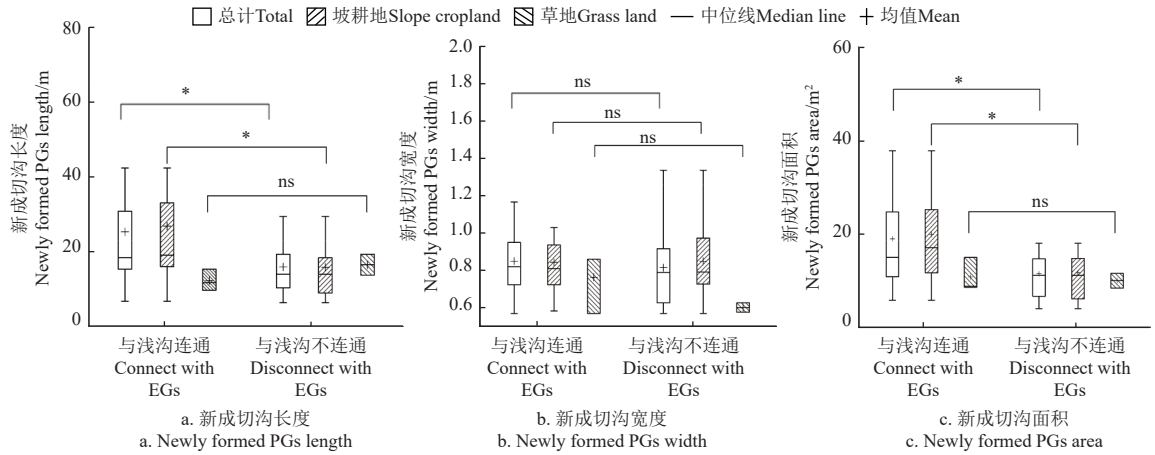
土地利用类型 Land use types	新成切沟数 Number of newly formed PGs		
	总数 Total	和浅沟连通 Connect with EG	和浅沟不连通 Disconnect with EG
坡耕地 Slope cropland	38	26	12
草地 Grass land	5	3	2

2.2 浅沟对切沟形态特征的影响

2.2.1 浅沟对新成切沟形态特征的影响

新成切沟的形态参数统计结果表明（图 4），3 个小流域的新成切沟的长度和面积均受沟头上方有无浅沟连通显著影响（P<0.05）。

沟头上方有浅沟连通情况下新成切沟平均长度显著大于无浅沟连通情况（P<0.05），平均沟长分别为 25.39 和 16.00 m，前者是后者的 1.59 倍，切沟沟长分别主要集中分布在 15.43～30.91 和 10.43～19.43 m；对新成切沟面积的影响主要是由于对长度的影响造成，有无浅沟连通情况下新成切沟平均面积分别为 18.95 和 11.46 m^2，并分别主要集中在 10.82～24.67 和 6.68～14.69 m^2。有无浅沟连通对新成切沟宽度无显著影响（P>0.05）。



注：*表示二者存在显著性差异（P<0.05），ns 表示二者不存在显著性差异（P>0.05）。下同。

Note：* indicates significance difference (P<0.05), and ns indicates no significant difference (P>0.05). Same below.

图 4 新成切沟形态参数

Fig.4 Morphological parameters of newly formed PGs

由图 4 还可知，浅沟连通性在不同土地利用上对新成切沟形态特征有影响。在坡耕地形成的新成切沟的长度和面积均值均受沟头上方有无浅沟连通的显著影响（P<0.05），平均沟长分别为 26.90 和 15.90 m，平均面积分别为 19.89 和 11.71 m^2；宽度并未受沟头上方有无浅沟连通的显著影响（P>0.05）。在草地上形成的新成切沟数量较少，无法进行显著性分析，与浅沟连通和不连通的新成切沟的长度、宽度均值分别为 12.34、0.76 m 和 16.61、0.60 m。面积均值分别为 10.79 和 9.98 m^2。

2.2.2 浅沟对原有切沟形态特征的影响

表 3 为研究区原有切沟沟头上方基本情况统计。本研究在岔巴沟上、中、下游 3 个小流域共调查了 301 条

原有切沟。301 条原有切沟中有 97 条和浅沟连通，占总数的 32.23%，204 条和浅沟不连通，占总数的 67.77%，其中上、中、下游分别有 20.90%、36.47%、34.90% 与浅沟连通。沟头上方的土地利用为坡耕地的原有切沟有 72 条，其中和浅沟连通和不连通的分别有 48 和 24 条；沟头上方的土地利用为草地的原有切沟有 175 条，其中和浅沟连通和不连通的分别有 49 和 126 条；沟头上方的土地利用为林地和梯田耕地的原有切沟分别有 7 条和 47 条，均与浅沟不连通。总的来说，坡耕地上原有切沟沟头上方与浅沟连通的情况更为普遍。

图 5 为原有切沟的形态参数统计。通过与浅沟连通的原有切沟和不连通的原有切沟的形态参数的对比可以看出，原有切沟的长度受沟头上方有无浅沟显著影响（P<0.01）。沟头上方有浅沟情况下原有切沟平均长度显著大于无浅沟情况（P<0.01），平均值分别为 40.54 和 30.91 m，前者是后者的 1.31 倍，集中分布在 23.01～52.75 和 19.51～37.67 m。沟头上方有无浅沟连通对原有切沟宽度和面积无显著影响（P>0.05）。宽度均值比较接近，分别为 12.36 和 11.88 m，集中分布在 6.82～17.03 和 6.69～15.57 m；在切沟面积均值上，与浅沟连通的原有切沟略大于不连通的原有切沟，分别为 483.14 和 410.62 m^2，集中分布在 167.82～700.17 和 116.74～524.48 m^2。

表 3　原有切沟沟头上方基本情况

Table 3　Basic situation of above existing PGs head

土地利用类型 Land use types	原有切沟数 Number of existing PGs		
	总数 Total	和浅沟连通 Connect with EG	和浅沟不连通 Disconnect with EG
坡耕地 Slope cropland	72	48	24
草地 Grass land	175	49	126
林地 Forest	7	0	7
梯田耕地 Terrace cropland	47	0	47
生产道路 Unpaved road	0	0	0
坝地 Dam cropland	0	0	0
建设用地 Construction land	0	0	0
其他土地 Other land	0	0	0
合计 Total	301	97	204

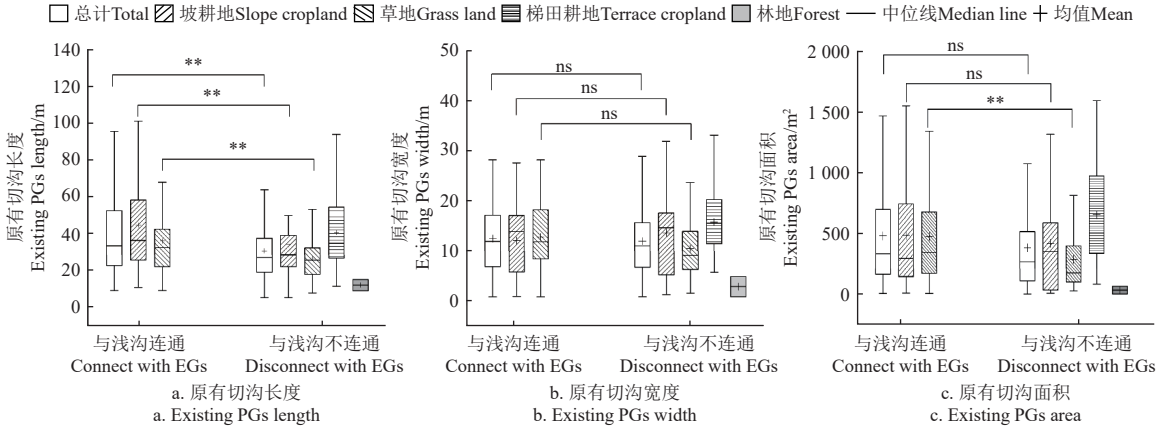


图 5　原有切沟形态参数

Fig.5　Morphological parameters of existing permanent gullies

由图 5 还可知，浅沟连通性在不同土地利用上对原有切沟形态特征有影响。其中，沟头上方土地利用为梯田耕地和林地的原有切沟均和浅沟不连通，其长度、宽度、均值分别为 40.84、15.69 m 和 12.44、2.81 m，面积均值分别为 711.44、39.21 m^2。沟头上方土地利用为坡耕地的原有切沟平均长度受沟头上方有无浅沟的显著影响（P<0.01），平均值分别为 44.96 和 34.57 m；宽度和面积均未受其显著影响（P>0.05），宽度均值分别为 11.99 和 13.56 m；面积均值分别为 486.89 和 507.84 m^2。沟头上方土地利用为草地的原有切沟的长度和面积均受有无浅沟连通的显著影响（P<0.01），长度均值分别为 36.20 和 26.96 m，面积均值分别为 479.47 和 290.56 m^2；宽度未受其显著影响（P>0.05），宽度均值分别为 12.72 和 10.34 m。

2.3　浅沟对切沟沟头发育的影响

2.3.1　浅沟对新成切沟沟头发育的影响

表 4 为 2017 年 8 月—2020 年 8 月 3 a 间研究区新成切沟沟头发育情况。在调查的 43 条新成切沟中，有 13 条沟头发生变化，7 条被填平，沟头发育的新成切沟占比为 36.11%。其中 29 条与浅沟连通的新成切沟中，10 条沟头继续发展，5 条被填平，沟头发育的新成切沟占比为 41.67%；14 条与浅沟不连通的新成切沟中，有 3 条沟头继续前进，2 条被填平，沟头发育的新成切沟占比为 25%，前者是后者的 1.67 倍。

表 4　新成切沟沟头发育情况

Table 4　Development of newly formed permanent gully heads

类型 Type	切沟条数 Number of PGs			占比 Proportion %
	总数 Total	变化数 Changed	填平数 Filled	
与浅沟连通 Connect with EGs	29	10	5	41.67
与浅沟不连通 Disconnected with EGs	14	3	2	25.00
合计 Total	43	13	7	36.11

注：占比指沟头发育的切沟占总切沟数的比例。表 5 同。

Note: Proportion is the percentage of gully head development in PGs. Same in Tab 5.

图 6 为新成切沟在暴雨后 3 a 的沟头前进速率。与浅沟连通的新成切沟的沟头前进速率的平均值为 0.45 m/a；与浅沟不连通的新成切沟的沟头前进速率的平均值为 0.25 m/a，前者是后者的 1.80 倍。

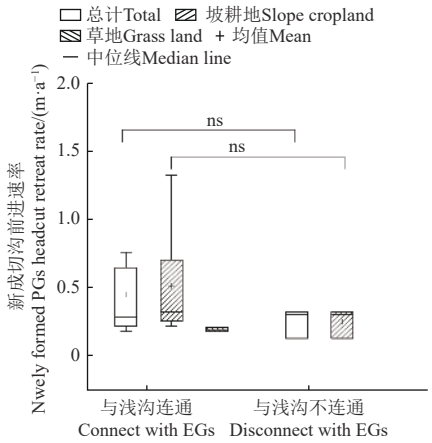


图 6 新成切沟沟头前进速率

Fig.6 Gully headcut retreat rate of newly formed PGs

由图 6 还可知，浅沟连通性在不同土地利用上对新成切沟沟头发育均有影响，坡耕地上与浅沟连通的新成切沟的沟头前进速率平均值大于与浅沟不连通的，平均值分别为 0.51 和 0.25 m/a。草地上，与浅沟连通的新成切沟的沟头前进速率平均值为 0.20 m/a，与浅沟不连通的新成切沟的沟头未发生溯源侵蚀。

2.3.2 浅沟对原有切沟沟头发育的影响

表 5 为 2017 年 8 月—2020 年 8 月 3 年间研究区原有切沟沟头发育情况。由表 5 可知，在调查的 301 条原有切沟中，有 62 条沟头发生变化，沟头发育的原有切沟占比为 20.60%。其中 97 条与浅沟连通的原有切沟中，37 条沟头继续发展，沟头发育的原有切沟占比为 38.14%；204 条与浅沟不连通的原有切沟中，有 25 条沟头继续前进，沟头发育的原有切沟占比为 12.25%。在 3 年时间尺度上，相比于和浅沟不连通的原有切沟，与浅沟连通的原有切沟的沟头发育的占比更大，是不连通的原有切沟的 3.11 倍。

表 5 原有切沟沟头发育情况

Table 5 Development of existing PG heads

类型 Type	切沟条数 Number of PGs			占比 Proportion %
	总数 Total	变化数 Changed	填平数 Filled	
与浅沟连通 Connect with EGs	97	37	0	38.14
与浅沟不连通 Disconnected with EGs	204	25	0	12.25
合计 Total	301	62	0	20.60

图 7 为研究区原有切沟 2017—2020 年沟头前进速率。由图 7 可知，原有切沟沟头的前进速率受沟头有无浅沟连通的显著影响，与浅沟连通的原有切沟的平均沟头前进速率为 0.26 m/a，主要集中在 0.14～0.32 m/a；与浅沟不连通的原有切沟的平均沟头前进速率为 0.12 m/a，主要集中在 0.09～0.14 m/a，前者是后者的 2.17 倍。

由图 7 还可知，浅沟连通性在不同土地利用上对原有切沟沟头发育均有显著影响（P<0.05）。在沟头上方土地利用为坡耕地的原有切沟中，与浅沟连通的原有切沟的沟头前进速率的平均值显著大于与浅沟不连通的原有切沟（P<0.05），二者分别为 0.31 和 0.13 m/a；在沟头上方土地利用为草地的原有切沟的沟头前进速率的平均值也受浅沟连通的显著性影响（P<0.05），平均值分别为 0.21 和 0.11 m/a。

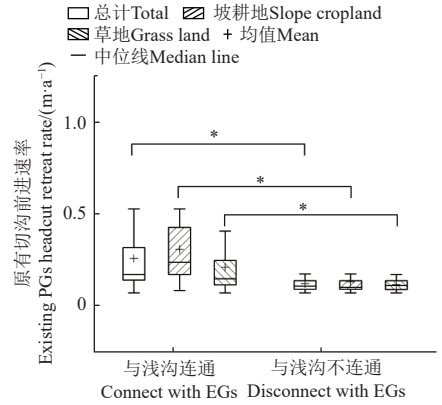


图 7 原有切沟沟头前进速率

Fig.7 Gully headcut retreat rate of existing PGs

3 讨 论

当坡面形成浅沟后，原始的坡面的形态发生了改变，伴随着不断的耕作和再侵蚀使得原本平整的坡面变成了瓦背状地形，改变了降雨侵蚀作用面形态，在相同降雨的情况下，浅沟发育的坡面的径流会迅速汇集，产流提前，流速增大，增加了土壤侵蚀的强度，有浅沟的坡面的侵蚀强度是无浅沟的坡面的 1.53 倍[22-25]。这也印证了本文关于浅沟对切沟发生、发育的促进作用。浅沟对于切沟发生、发育的影响机制还体现在对水文和泥沙连通性的改变上[26-28]，当切沟沟头上方形成浅沟后，为坡面径流和泥沙输移提供了更加便捷的通道，从而为切沟的发生、发育提供了更加有利的条件。

3.1 浅沟连通性在不同土地利用上对切沟发生和发育的影响

土地利用对切沟发生、发育方面具有重要的作用。草地和林地等植被能够有效地截留降水，增加土壤入渗的性能[29]，有效地减少产流和降低径流流速[30]，降低径流侵蚀动力；相对于草地和林地等植被，农地坡面由于失去植被根系对土壤的固持作用，更容易形成沟蚀[31]；梯田使得坡面变短、坡度变缓，从而减少了水流能量[32]，在黄土高原，水平梯田改变了坡度和径流系数，缩短了坡长，具有较强的水土保持作用[33]。为了研究浅沟对切沟发生、发育的影响是否是受不同土地利用类型导致，从而更加客观的研究浅沟对切沟发生、发育的影响，本研究区分了不同土地利用下浅沟与切沟连通性对切沟发生、发育的影响。总的来看，在不同土地利用上，浅沟连通性对切沟的发生和发育都有较为明显的影响。

3.2 浅沟连通性在极端暴雨事件中对切沟发生和发育的影响

极端暴雨事件能产生大量的地表径流并且使其迅速汇集，产生巨大的侵蚀动能，而浅沟连通性会直接影响新成切沟的产生和分布格局。陈卓鑫等[34]的研究表明，在极端暴雨情况下瓦背状地形的凹地部分新成切沟分布密集。由于新成切沟的不稳定性，其在暴雨后的发育相较于原有切沟更加活跃，杨丽娟等[18]的研究表明，新成切沟在形成后的 3 a 中沟头进一步发育的概率和沟头前

进速率相较于原有切沟更大，分别是原有切沟的 1.32 倍和 3.00 倍，这与本研究结果相似，并且从本研究的结果看，与浅沟连通的新成切沟的沟头发育速率的平均值是与浅沟不连通的新成切沟的 1.80 倍，因此在切沟治理过程中要更加重视新成切沟尤其是与浅沟连通的新成切沟的后续发展。退耕还林还草的黄土高原地区依然存在大面积陡坡耕作的现象，杨萌等[35] 的研究表明，在岔巴沟流域还存在 2 000 多公顷的坡耕地，约占整个流域面积的 11%，杨波等[36] 的研究表明，在极端暴雨情况下坡耕地极易发生土壤侵蚀。本研究中坡耕地上存在浅沟的坡面极易发育新成切沟，因此在坡耕地上应进一步研发浅沟向切沟发展的阻控技术，防止现有黄土浅沟进一步转化为切沟。

退耕还林（草）等措施实施二十余年以来，黄土高原的土壤侵蚀状况得到了极大的改善，但是水土保持工作依然面临着许多挑战。本研究基于高分辨率影像和野外实测研究了浅沟对切沟发生、发育的影响，为黄土高原侵蚀沟的治理提供了更多的理论依据。在下一步的研究当中，应该进一步揭示浅沟向切沟发展的机理与空间分异规律，重点关注浅沟向切沟发展的阻控技术，为黄土耕地保护和生态治理提供进一步的科学支撑。

4　结　论

本文基于高精度野外实测、高分辨率无人机影像、Google Earth 影像，在典型黄土丘陵沟壑区岔巴沟流域上、中、下游选取 3 个具有代表性的子流域系统研究了浅沟连通性对切沟发生、发育的影响。得出的主要结论如下：

1）浅沟连通性对切沟的新成有明显的促进作用，在极端暴雨情况下，67.44% 的新成切沟发生在存在浅沟的坡面。

2）浅沟连通性对切沟的形态特征影响显著（$P<0.05$），主要影响切沟沟长。无论是新成切沟还是原有切沟，与浅沟连通的切沟的长度均显著大于与浅沟不连通的切沟（$P<0.05$）。

3）浅沟连通性对切沟多年尺度沟头发育有显著促进作用（$P<0.05$）。对于新成切沟和原有切沟，与浅沟连通情况下沟头发育的切沟占比分别是不连通情况下的 1.67 和 3.11 倍；在新成切沟和原有切沟的沟头前进速率上，与浅沟连通情况下也分别达到了不连通情况下的 1.80 和 2.17 倍。同时，沟头上方浅沟连通对其下方原有切沟发育的促进作用在坡耕地上和草地上均达到显著水平（$P<0.05$），其沟头前进速率均显著大于不连通的切沟。

［参　考　文　献］

[1] 朱显谟，任美锷. 中国黄土高原的形成过程与整治研究[J]. 中国人口·资源与环境，1991，1(1)：21-28.
ZHU Xianmo, REN Meie. Research on the course of formation and renovation of the Loess Plateau in China[J]. China Population, Resources and Environment, 1991, 1(1): 21-28. (in Chinese with English abstract)

[2] 周璐红，王盼婷，曹瑞超. 2000—2020 年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价[J]. 生态与农村环境学报，2022，38(4)：511-520.
ZHOU Luhong, WANG Panting, CAO Ruichao. Soil erosion driving factors and ecological security evaluation for Yan'an City from 2000 to 2020[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(4): 511-520. (in Chinese with English abstract)

[3] 刘元保，朱显谟，周佩华，等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊，1988，7(1)：9-18.
LIU Yuanbao, ZHU Xianmo, ZHOU Peihua, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau[J]. Memoir of NISWC, Academia Sinica, 1988, 7(1): 9-18. (in Chinese with English abstract)

[4] 蒋德麒，赵诚信，陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. 地理学报，1966，32(1)：20-36.
JIANG Deqi, ZHAO Chengxin, CHEN Zhanglin. Analysis of the source of sediment in the middle reach of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 1966, 32(1): 20-36. (in Chinese with English abstract)

[5] 伍永秋，刘宝元. 切沟、切沟侵蚀与预报[J]. 应用基础与工程科学学报，2000，8(2)：134-142.
WU Yongqiu, LIU Baoyuan. Gully, gully erosion and prediction[J]. Journal of Basic Sciencea and Engineering, 2000, 8(2): 134-142. (in Chinese with English abstract)

[6] 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. Discriminations 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)

[7] LI Y, POESEN J, YANG J C, et al. Evaluating gully erosion using 137 Cs and 210 Pb / 137 Cs ratio in a reservoir catchment[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69(1): 107-115.

[8] 王海于，庞国伟，王春梅，等. 基于无人机航摄的坡形对浅沟发育的影响[J]. 水土保持学报，2022，36(4)：85-91.
WANG Haiyu, PANG Guowei, WANG Chunmei, et al. Effects of slope on ephemeral gully development based on UAV[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 85-91. (in Chinese with English abstract)

[9] 仲原，王春梅，庞国伟，等. 黄土高原浅沟空间分异特征[J]. 生态学报，2022，42(5)：1798-1810.
ZHONG Yuan, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. Spatial variation of ephemeral gully in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1798-1810. (in Chinese with English abstract)

[10] 苏建华，王春梅，庞国伟，等. 黄土高原切沟空间分布特征[J]. 水土保持研究，2023，30(1)：134-143.
SU Jianhua, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. Spatial distribution of gullies in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 134-143. (in Chinese with English abstract)

[11] 赵宇辉，张建军，于洋，等. 晋西黄土区蔡家川小流域切沟的空间分布及形态特征[J]. 农业工程学报，2022，38(4)：151-158.
ZHAO Yuhui, ZHANG Jianjun, YU Yang, et al. Spatial distribution and characteristics of the gullies in Caijiachuan watershed in loess region of Western Shanxi Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 151-158. (in Chinese with English abstract)

[12] 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, ZHEN 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)

[13] 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)

[14] 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（中英文），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)

[15] 张岩，杨松，李镇，等. 陕北黄土区水平条带整地措施对切沟发育的影响[J]. 农业工程学报，2015，31(7)：125-130.
ZHANG Yan, YANG Song, LI Zhen, et al. Effect of narrow terrace on gully erosion in Northern Shaanxi Loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 125-130. (in Chinese with English abstract)

[16] 杨波，王文龙，张闯娟，等. “7·26”暴雨下不同土地利用坡面浅沟沟槽发育特征及体积估算[J]. 农业工程学报，2019，35(9)：121-128.
YANG Bo, WANG Wenlong, ZANG Chuangjuan, et al. Development characteristics and volume estimation of ephemeral gully groove for different land use slopes undergoing "7·26" torrential rain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 121-128. (in Chinese with English abstract)

[17] 郑明国，梁晨，廖义善，等. 极端降雨情形下黄土区水土保持治理的减沙效益估算[J]. 农业工程学报，2021，37(5)：147-156.
ZHEN Mingguo, LIANG Chen, LIAO Yishan, et al. Estimation of sediment reduction benefit by soil and water conservation under extreme rainfall in a loess watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 147-156. (in Chinese with English abstract)

[18] 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.
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)

[19] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报，2020，34(5)：1-13.
ZHANG Guanghui. Advances and prospects for gully erosion researches[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[20] MATTHIAS V, JEAN P, BERTE V M, et al. How fast do gully headcuts retreat?[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 336-355.

[21] GB/T 21010-2017，土地利用现状分类[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[22] 张新和，郑粉莉，汪晓勇，等. 上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2008，36(3)：105-110.
ZHANG Xinhe, ZHEN Fenli, WANG Xiaoyong, et al. Effects of upslope runoff on loessial hillslope erosion pattern evolution process and erosion sediment[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2008, 36(3): 105-110. (in Chinese with English abstract)

[23] 张科利. 浅沟发育对土壤侵蚀作用的研究[J]. 中国水土保持，1991(4)：19-21.
ZHANG Keli. Study on the effect of ephemeral gully development on soil erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1991(4): 19-21. (in Chinese with English abstract)

[24] 张科利，唐克丽. 浅沟发育与陡坡开垦历史的研究[J]. 水土保持学报，1992，6(2)：59-62.
ZANG Keli, TANG Keli. Study on the development of ephemeral gullies and reclamation history of steep slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(2): 59-62. (in Chinese with English abstract)

[25] 张科利，唐克丽，王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. 水土保持学报，1991，5(2)：8-13.
ZHANG Keli, TANG Keli, WANG Binke. A study on characteristic value of ephemeral gully erosion genesis on slope farmland in the Loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 8-13. (in Chinese with English abstract)

[26] MARIANO M L H, JOSE M N, LUIS M M, et al. Plot‐scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient[J]. Water Resources Research, 2010, 46(4): 475-478.

[27] 严晰芹，焦菊英，唐柄哲，等. 泥沙连通性研究方法进展[J]. 泥沙研究，2021，46(2)：59-65.
YAN Xiqin, JIAO Juying, TANG Binzhe, et al. Review on study approaches of sediment connectivity[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2): 59-65(in Chinese with English abstract)

[28] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. 水科学进展，2021，32(2)：295-308.
ZHANG Guanghui. Understanding sediment connectivity from soil erosion perspective[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 295-308. (in Chinese with English abstract)

[29] CHEN H, ZHANG X P, MURATJAN A, 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.

[30] GUO M M, WANG W L, WANG T C, et al. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(4): 1038-1050.

[31] WANG Z J, JIAO J Y, SCOTT R, et al. Soil erosion resistance of “Grain for Green” vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 141: 109-116.

[32] 董敬兵，时鹏，李占斌，等. 植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J]. 农业工程学报，2022，38(20)：96-104.
DONG Jinbing, SHI Peng, LI Zhanbin, et al. Effects of the role of vegetation and terraced measures on the rill erosion in slope-gully system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(20): 96-104. (in Chinese with English abstract)

[33] 焦菊英，王万中. 黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J]. 农业工程学报，1999，15(2)：65-69.
JIAO Juying, WANG Wanzhong. Quality and soil-water conservation effectiveness of level terrace on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 65-69. (in Chinese with English abstract)

[34] 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)

[35] 杨萌，宋晓鹏，张岩，等. 黄土高原丘一区典型流域坡耕地分布及其侵蚀地形特征[J]. 中国水土保持科学（中英文），2020，18(6)：1-8.
YANG Meng, SONG Xiaopeng, ZHANG Yan, et al. Distribution of sloping cropland and correlative erosional landform in typical watersheds on the hilly Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[36] 杨波，焦菊英，马晓武，等. 2022 年黄土高原典型暴雨侵蚀及洪水灾害调查分析[J]. 水土保持通报，2022，42(6)：1-13.
YANG Bo, JIAO Juying, MA XiaoWu, et al. Investigation and analysis of typical rainstorm erosion and flood disaster on Loess Plateau in 2022[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 1-13. (in Chinese with English abstract)

Influence of ephemeral gullies on the occurrence and development of permanent gullies in the Loess Hilly Gully Region of China

WANG Qiang, WANG Chunmei※, PANG Guowei, LONG Yongqing, WANG Lei, SHEN Huazhen, YANG Lijuan, YANG Qinke

(1. *Shaanxi Key Laboratory Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity*, *College of Urban and Environmental Sciences*, *Northwest University*, *Xi'an* 710127, *China*;　2. *Key Laboratory of Ecohydrology and Disaster Prevention in Arid Regions*, *National Forestry and Grassland Administration*, *Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: Ephemeral and permanent gullies are vital components of erosion gully system, and the existence of a significant correlation between them has become one of the critical scientific questions in the control of gully erosion on the Loess Plateau in the new era. This study aims to explore the effect of ephemeral gullies above the head of permanent gullies on the occurrence and development of the connected permanent gullies in the Loess Plateau. Three typical small watersheds were selected as the research area located in the upper, middle, and lower reaches of the Chabagou watershed in Zizhou, Shaanxi Province. This study systematically analyzes the current connectivity between ephemeral and permanent gullies in the hilly-gully region of Loess Plateau and the impact of this connectivity on the formation under extreme rainstorm and their further development were explored at a three-year time scale based on unmanned aerial vehicle（UAV） aerial photography and high-precision modern measurement technology. The results showed that: 1）The hillslopes with ephemeral gullies were more conducive to newly formed permanent gullies under the '7.26' extreme rainstorm in northern Shaanxi in 2017. A total of 43 newly formed permanent gullies occurred in the three small watersheds during the rainstorm, of which 67.44 % were connected with ephemeral gullies. 2）The existence of ephemeral gully in the upstream of permanent gully head had an important influence on permanent gullies morphological characteristics. The permanent gullies connected with the ephemeral gullies were significantly longer than that disconnected with the ephemeral gullies, and the width of the permanent gullies was not significantly influenced. 3）Upslope ephemeral gullies also significantly affected the development of permanent gullies connected downslope. On the 3 a time scale after the ' 7.26 ' rainstorm in 2017, the permanent gullies connected with ephemeral gullies were more active in the subsequent development process than the ones not connected with ephemeral gullies. The proportion of gully head development in permanent gullies for newly formed permanent gully heads connected with ephemeral gullies was 1.67 times that of non-ephemeral gully-connected permanent gullies. and the gully headcut retreat rate was 1.80 times. For the existing permanent gullies, the above rates were 3.11 times and 2.17 times, respectively. This study can provide a theoretical basis for more effective management of gully erosion in the hilly-gully region of Loess Plateau.

Keywords: remote sensing; unmanned aerial vehicle; permanent gully; ephemeral gully; Loess Plateau; connectivity