

特大暴雨下不同土地利用类型坡面切沟发育特征

陈卓鑫¹, 王文龙^{1,2*}, 康宏亮¹, 杨波³, 赵满⁴, 王文鑫¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003;
4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310000)

摘 要: 切沟侵蚀是黄土高原丘陵沟壑区水土流失的重要形式之一, 然而极端暴雨条件下不同土地利用类型坡面切沟侵蚀研究还鲜见报道。该研究以陕北 2017 年“7·26”特大暴雨为例, 研究了岔巴沟流域 3 种土地利用类型(农地、休闲地和撂荒地)坡面切沟发育形态特征及体积估算模型。结果表明: 1) 农地、休闲地和撂荒地切沟长度分布在 20 m 内的占比分别为 55.6%、34.8%和 44.8%; 农地切沟平均深度为 110 cm, 分别比休闲地和撂荒地高 18.3%、19.2%; 农地和休闲地切沟平均宽深比分别为 0.87 和 0.84, 横断面呈“宽-浅型”, 而撂荒地切沟呈“方型”(宽深比 1.01)。2) 撂荒地切沟侵蚀体积分别比农地和休闲地减少 47.8%和 28.3%, 表明植被恢复有效地削弱了极端暴雨作用下的切沟侵蚀。3) 农地切沟不同坡段侵蚀体积由高到低为下坡、上坡、中坡, 而休闲地和撂荒地切沟侵蚀体积沿坡长方向呈递增趋势; 3 种土地利用类型切沟在上坡段的沟岸拓宽速率大于下切速率, 中下坡则相反。4) 农地、休闲地和撂荒地切沟侵蚀体积均与切沟长度、横断面面积呈极显著幂函数关系($P<0.001$), 横断面面积是切沟体积估算更为有效的参数。研究结果可为黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用类型坡面切沟侵蚀体积估算及其防治提供重要依据。

关键词: 土地利用; 侵蚀; 坡面; 特大暴雨; 切沟; 植被恢复; 黄土高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.009

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-23-0077-08

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.009 <http://www.tcsae.org>

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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.009 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

沟蚀作为一种常见的土壤侵蚀类型, 其演变过程通常分为细沟、浅沟、切沟和冲沟等不同阶段^[1]。而切沟是水力侵蚀的最严重阶段^[2], 切沟沟头前进、沟岸扩张和沟底下切各阶段的土壤侵蚀极为活跃, 是流域的主要泥沙来源, 也是黄土高原环境恶化的重要原因之一^[3]。为了遏制水土流失、恢复脆弱生态环境, 政府于 1999 年大规模实施了退耕还林(草)工程。经过持续有效地治理, 黄土高原的植被覆盖度指数由 1999 年的 32%增加到 2018 年的 63%, 黄河入沙量趋势性减少^[4]。然而, 伴随着全球气候变暖, 近年来黄土高原地区的特大暴雨事件呈多态势发展^[5], 黄土坡面在遭遇特大暴雨事件后, 植被恢复是否能够有效控制坡面切沟形成及控制水土流失还有待考证。

土地利用方式和人类活动显著影响了切沟形成过程^[6]。植被恢复可通过影响土壤性质和地表水文过程来控制切沟的形成^[7]。在黄土高原“退耕还林(草)”工程实施

5 a 后, 退耕地土壤持水能力比继续耕作的土壤持水能力提高了 55%^[8]。土壤性质的改善可能提高了坡面形成切沟的暴雨阈值, 当超过暴雨阈值后, 坡面形成的切沟面积和体积随着降雨量的增加而显著增大^[9]。不同土地利用类型坡面切沟侵蚀对暴雨的响应能力也明显不同, 农地坡面由于失去植被根系对土壤的固持作用, 相对于草地和林地更易形成沟蚀^[10], 且农地型切沟尺寸明显小于草地型切沟尺寸^[9]。受汇水面积等因素的影响, 切沟形态特征沿坡长方向也存在差异, 速欢等^[11]研究发现切沟形态沿坡长方向呈“宽浅-窄深-宽浅”式发展。而对于切沟的不同部位而言, 沟头是沟底下切最活跃的区域, 沉积区主要发生在切沟的中上部和中下部^[12]。近年来, 基于三维激光扫描、三维立体摄影技术等生成的高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)对小流域尺度切沟体积估算模型研究等方面也得到快速发展^[9,13], 李镇等^[14]利用高精度 DEM 构建了晋西黄土区体积-沟长和体积-横断面面积切沟体积估算模型。但该方法获取数据的精度易受植被等地表因素的干扰, 多针对于低植被覆盖坡面切沟的研究。目前, 极端暴雨作用下的切沟侵蚀研究, 野外实地勘测是获取第一手资料最为重要的手段之一, 也是对切沟侵蚀预报研究的关键补充。

尽管黄土高原“退耕还林(草)”工程的实施显著提高了土壤抗蚀能力, 但在特大暴雨等极端气候条件下, 植

收稿日期: 2020-07-27 修订日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571275); 水利部“726”特大暴雨水土流失调查项目

作者简介: 陈卓鑫, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: xiyu.zxchen@foxmail.com

*通信作者: 王文龙, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和生产建设水土保持研究。Email: wllwang@nwsuaf.edu.cn

被恢复后的小流域遭受严重土壤侵蚀的例子仍很常见^[5]。目前的研究多集中在暴雨条件下坡面细沟发育^[15-16]、道路侵蚀^[17]以及梯田破坏^[18]等方面,而针对于极端暴雨条件下不同土地利用类型的切沟侵蚀研究还较为鲜见。因此,本研究以陕北“7·26”特大暴雨形成的切沟为研究对象,探究不同土地利用类型对坡面切沟发育的影响,构建不同土地利用类型坡面切沟体积估算模型,以期为特大暴雨条件下的切沟防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 暴雨和洪水情况

2017 年 7 月 25 日—26 日,陕北榆林地区突降一场五百年一遇的特大暴雨^[19]。暴雨中心区集中在子洲、绥德、米脂一带。据文献统计及流域水文站气象资料显示^[20-21],日降雨量在 100 mm 以上的雨区面积达 5 484 km²,部分地区降雨量超过 200 mm。12 h 最大降雨量子洲县水地湾站为 236.6 mm、李家圪站为 217.8 mm、绥德县赵家砭站为 257.7 mm。从李家圪站降雨过程看,1、3、6 h 最大降雨量分别为 66.6、125.8、232.8 mm,远大于特大暴雨的划分标准,总降雨量接近当地多年平均降雨量的 50%。此外,受暴雨的影响,多个水文站出现超警戒洪峰,其中绥德站出现了自 1960 年有实测资料以来的最大洪水(洪峰流量达 3 160 m³/s),水位超过历史实测最高水位 4.11 m。同时,该次暴雨洪水含沙量高,岔巴沟草坪站高达 271 kg/m³,致使流域内水利设施损毁、房屋被毁、道路受阻。

1.2 研究区概况

岔巴沟流域位于陕西省子洲县北部(37°37'31"N~37°47'57"N, 109°3'1"E~109°47'16"E),流域面积约 205 km²,属于黄土丘陵沟壑区第一副区,黄河中游多沙多水区。流域内梁峁起伏,沟壑纵横,地面切割较深,沟缘线十分明显,主要有梁地沟谷和峁地沟谷 2 种地貌类型,具于典型的黄土丘陵沟壑地貌特征^[22]。该流域地

跨中温带与暖温带之间的亚干旱区,具有大陆性季风气候特点。年平均气温约为 9℃,年降雨量在 450 mm 左右,降雨年际分配极不均匀,70%集中在 7、8 月,且多为短历时的强暴雨。土壤类型以黄土母质发育的黄绵土为主,黏粒含量低,土质疏松,在暴雨作用下极易发生水力侵蚀,其中沟蚀是主要的侵蚀方式,多年平均侵蚀模数为 15 780 t/km²^[18]。目前,该流域内主要代表植被类型包括马铃薯(*Solanum tuberosum*)、小米(*Setaria italica*)和玉米(*Zea mays*)等农作物,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Prunus armeniaca*)为主的乔木和白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等草本类植物。

1.3 样点的选择

自 1999 年退耕还林(还草)工程实施以来,岔巴沟流域内植被覆盖度增长明显,2018 年植被覆盖度达到 53.1%,使流域内土地利用结构发生了巨大变化^[23],流域内大量的陡坡农地经弃耕撂荒或恢复草被而演替为撂荒地,然而,由于人地矛盾的存在,流域内部分陡坡农地仍然存在。因此,本次切沟侵蚀调查的土地利用类型包括以下 3 种^[24]: 1) 经退耕还林(还草)措施后或耕作困难逐渐弃耕有草被覆盖的撂荒地; 2) 种植小米、高粱、大豆等农作物的农地; 3) 休闲年限 1 a 内的休闲地。基于对岔巴沟流域前期资料的分析以及综合专家团队的选点考察^[15,25],利用 Google Earth 把流域分为上、中、下游 3 个部分,在每个部分分别选择了 4 个具有完整集水区的小流域,选定的小流域沿着主沟道基本呈对称分布。结合考察范围的合理性以及调查的准确性,每个小流域面积宜分布在 0.2~0.5 km²。因此,本研究共选取了 12 个小流域样点进行了详细的切沟侵蚀考察和测量(如图 1 所示),以反映岔巴沟流域的切沟侵蚀特征。在进行实地调查时,若发现在已选定的小流域中存在大量的人为扰动导致切沟侵蚀调查精度受到影响的情况下,则选用与此流域相邻的备用样点。

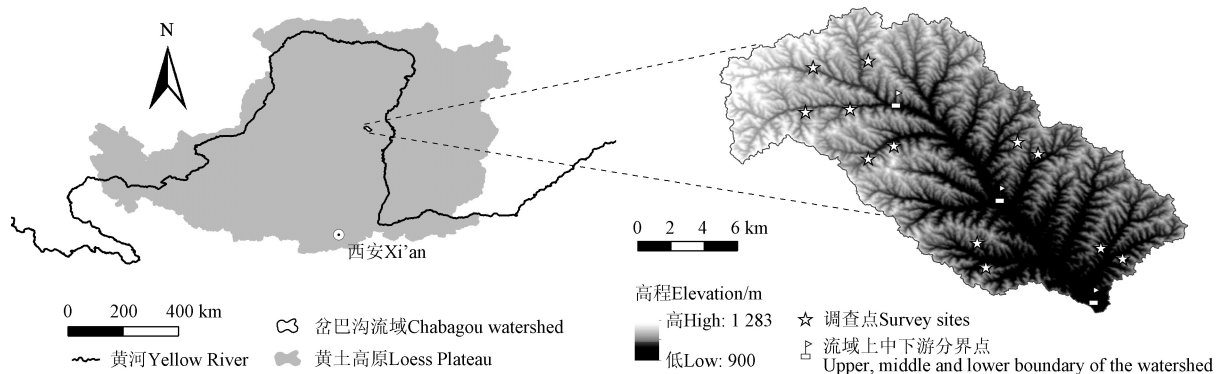


图 1 岔巴沟流域调查点分布图
Fig.1 Distribution of survey points in Chabagou watershed

1.4 切沟侵蚀调查方法

收集“7·26”暴雨前的遥感影像,并利用 Google Earth 对选定流域内的坡面切沟进行勾勒,可以很好地反映出小流域的原始切沟分布情况及其坡面土地利用情况,为实地调查提供数据支撑。一般情况下,农地上的细沟及浅沟沟槽在前期的耕地、除草、种植等措施中已被填实,

因此调查中发现农地的切沟可基本认定为由本次特大暴雨所导致;休闲地和撂荒地坡面由此次暴雨导致的切沟主要通过观察切沟断面的节理,生物结皮、植被滑落情况以及结合暴雨前的遥感影像资料来综合判断。

此次调查采取基于 Google 卫星地图的奥维互动地图软件和实地测量相结合的方法。调查人员分为 2 组,分

别从流域的集水区出口出发, 沿着两岸的沟沿线上方进行由此次暴雨所导致的所有切沟侵蚀的测量和记录, 并利用望远镜和对讲机观察对岸的调查盲区, 以全面考察坡面的切沟侵蚀情况, 并在切沟发生的地方进行定位。使用激光测距仪和 50 m 量程皮尺测量切沟的长度, 使用 10 m 量程钢卷尺测量切沟宽度(上宽和底宽)和深度。首先沿长度方向把切沟分成上、中、下 3 个部分, 当切沟长度 ≤ 20 m 时, 每个部分隔 2 m 测量 1 次宽和深; 当切沟长度 > 50 m 时, 每隔 5 m 测量 1 次, 若切沟断面变化较为复杂时, 适当增加测量次数以保证测量精度。同时记录坡面土地利用类型, 本次共调查切沟 140 条, 其中农地 45 条、休闲地 66 条、撂荒地 29 条。

1.5 相关参数的计算方法

1) 切沟长度值为切沟上、中、下 3 个部分的和, 切沟宽度值为切沟各部分测量点处的上宽与底宽的均值, 切沟深度值为切沟各部分测量点处深度的均值。

2) 切沟宽深比指切沟宽度与其对应深度的比值, 无量纲, 计算方法如式(1)所示:

$$R_{wd} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{D_i}}{n} \quad (1)$$

式中 R_{wd} 为切沟宽深比; W_i 为第 i 个测量点切沟的宽度, cm; D_i 为第 i 个测量点切沟的深度, cm; n 为测量次数。

3) 切沟横断面面积计算方法如式(2)所示:

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot D_i)}{n} \quad (2)$$

式中 C_a 为切沟横断面面积, m^2 。

4) 切沟体积用来表示切沟侵蚀量, 计算公式如式(3)所示:

$$V_G = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(W_{iu} + W_{id})}{2} D_i \cdot L_i \right] \quad (3)$$

式中 V_G 为切沟体积, m^3 ; W_{iu} 为第 i 段的平均切沟上宽, m; W_{id} 为第 i 段的平均切沟底宽, m; D_i 为第 i 段的平均切沟深度, m; L_i 为第 i 段的坡面切沟测量长度, m。

5) 频率指切沟某个指标发生在某个区间的可能性大小, 计算方法如式(4)所示:

$$F = \frac{m}{k} \times 100\% \quad (4)$$

式中 F 为切沟某个指标的频率, %; m 为切沟某个指标出现在某个区间的次数; k 为切沟总条数。

1.6 数据分析

本文使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理, 使用 R 软件(版本 R-3.6.3)进行数据分析, 使用 Arcgis10.4、R 包 ggplot2 和 OriginPro2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型坡面切沟形态参数频率分布

由图 2 可知, 1) 切沟长度集中分布在 40 m 内, 累积频率均在 70% 以上; 其中分布在农地、休闲地、撂荒地坡面的切沟长度均在 20 m 内分布频率最大, 占比分别

为 55.6%、34.8% 和 44.8%, 而对于 20~30 cm 和 40~50 cm, 农地分布频率最小、撂荒地分布频率最大。2) 切沟宽度均集中分布在 0~80 cm 范围, 累积频率均在 60% 以上; 农地、休闲地和撂荒地分布频率随宽度的增加分别呈增加-降低-增加趋势、增加-降低趋势和降低趋势, 分别在 60~80、40~60 和 < 40 cm 分布最大, 最大分布频率分别为 33.3%、31.8% 和 34.5%。3) 切沟侵蚀深度集中分布在 100 cm 以上, 农地、休闲地、撂荒地坡面切沟深度所占比例分别为 40.0%、33.3% 和 41.4%。4) 切沟横断面面积主要集中在 $1 m^2$ 范围内, 累积频率均为 65% 以上; 其中, 农地、休闲地、撂荒地坡面切沟横断面面积均在 0~0.5 m^2 范围最大, 所占比例分别为 48.9%、45.5% 和 41.4%, 而后随横断面面积的增加呈降低趋势。

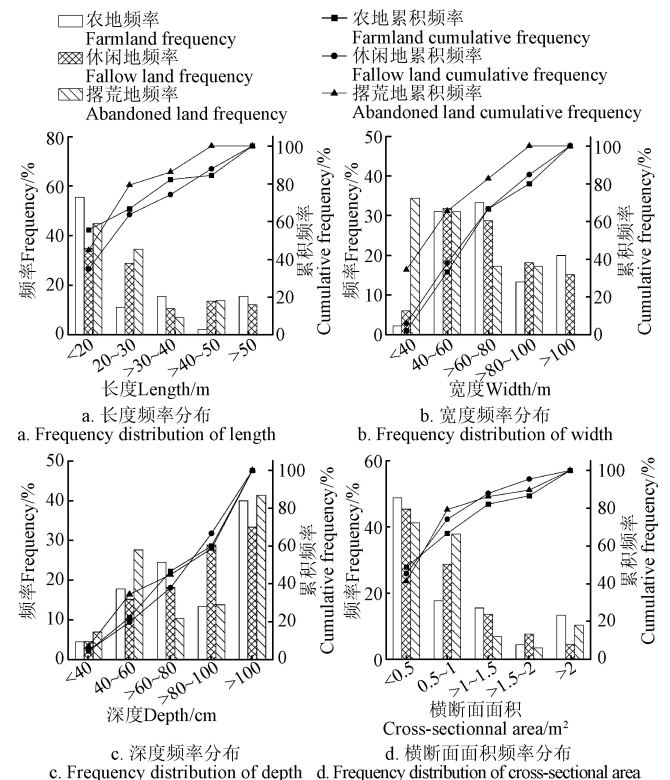


图 2 不同土地利用类型坡面切沟横断面形态参数频率分布

Fig.2 Frequency distribution of morphological parameters of gully section on slopes with different land uses

2.2 不同土地利用类型坡面切沟形态参数特征

图 3 表征了不同土地利用类型坡面的切沟横断面形态特征, 其中休闲地切沟发育平均长度最大 (29.7 m), 分别比农地和撂荒地切沟发育平均长度高 14.8% 和 42.9%; 不同土地利用类型坡面切沟平均宽度按大小排序为农地、撂荒地、休闲地; 农地切沟的平均侵蚀深度为 110 cm, 分别比休闲地和撂荒地高 18.3% 和 19.2%; 撂荒地切沟的平均侵蚀体积最小, 分别比休闲地和撂荒地降低 47.8% 和 28.3%; 农地平均横断面面积是休闲地和撂荒地的 1.61 倍和 1.33 倍; 侵蚀沟横断面的宽深比是反映切沟形态的重要指标^[14,26], 不同土地利用类型坡面切沟横断面宽深比大部分点落在 1:1 线的下方(图 4), 农地和休闲地切沟平均宽深比分别为 0.87 和 0.84, 横断面呈

“宽-浅型”，而撂荒地切沟呈“方型”（宽深比为 1.01）。结合一元线性回归方程的斜率可以看出（图 4），在暴雨作用下不同土地利用类型坡面切沟的侵蚀进程存在差

异，其中撂荒地相对于农地和休闲地的切沟沟壁拓宽能力较强，整体上不同土地利用类型坡面横向拓宽侵蚀速率小于沟底的下切速率。

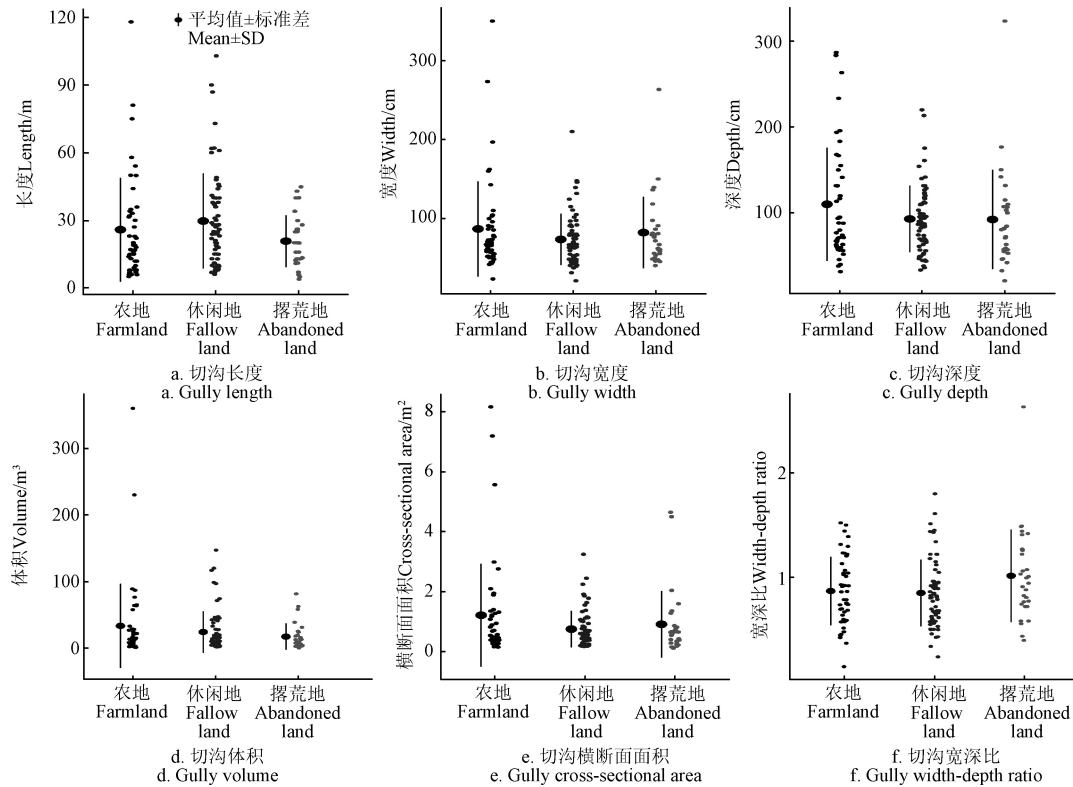
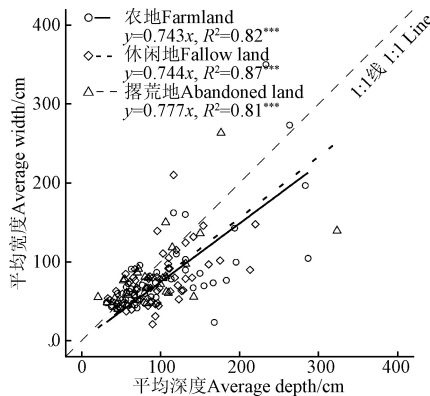


图 3 不同土地利用类型坡面切沟横断面形态特征

Fig.3 Morphological characteristics of gully on slopes with different land uses



注 (Note): ***, $P < 0.001$.

图 4 不同土地利用类型坡面切沟平均宽度和平均沟深之间的关系

Fig.4 Relationship between average width and average depth of gully on slopes with different land uses

2.3 不同坡段切沟宽深比及其体积变化

上坡段的宽深比均大于 1，整体上中坡段和下坡段的宽深比小于 1（图 5a），这表明在暴雨作用下坡面上坡段以沟岸拓宽为主，随着汇水面积的增加，在中下坡形成以下切侵蚀为主的沟蚀形式；就不同土地利用类型而言，上坡段的农地宽深比最小，休闲地和撂荒地的宽深比分别较之高出 0.5%和 36.5%，中坡段表现为休闲地最小、

其次为农地，而对于下坡段，宽深比最大为休闲地、撂荒地次之、最小为农地。对于体积变化而言（图 5b），农地切沟不同坡段侵蚀体积按大小排列为下坡、上坡和中坡，而休闲地和撂荒地切沟侵蚀体积沿坡长方向呈递增趋势；而对于相同坡段的不同土地利用类型而言，均为农地最大、休闲地次之、撂荒地最小，相比于农地的上坡、中坡和下坡位置，休闲地分别降低 40.0%、15.2%和 23.6%，撂荒地分别降低 63.5%、57.6%和 37.5%，这可能与农地土质的易蚀性以及植被减蚀作用有关^[27]。

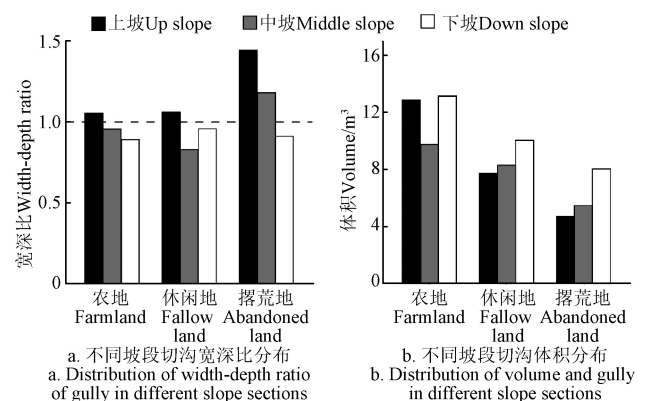


图 5 不同坡段切沟宽深比和平均体积变化

Fig.5 Changes of width-depth ratio and volume of gully in different slope sections

2.4 不同土地利用类型坡面切沟侵蚀体积估算

沟长 (L) 和横断面面积 (A) 被作为估算切沟体积 (V) 的主要参数, 其函数关系大多以幂函数的形式表示。回归分析结果表明 (图 6), 农地、休闲地和撂荒地的切沟侵蚀体积与切沟长度之间呈极显著的幂函数关系 ($P<0.001$), 调整后的决定系数 (R^2_{adj}) 按大小排列为休闲地、农地、撂荒地, 休闲地的体积估算模型更优; 对于 $V-A$ 估算模型, 农地、休闲地和撂荒地切沟侵蚀体积与横断面面积之间可用极显著的幂函数关系进行描述 ($P<0.001$), 撂荒地 $R^2_{adj}>$ 农地 $R^2_{adj}>$ 休闲地 R^2_{adj} 。对于各土地利用类型而言, 横断面面积估算体积的 R^2_{adj} 高于长度估算体积的 R^2_{adj} 。因此, 在特大暴雨作用下岔巴沟流域切沟侵蚀 $V-L$ 估算模型比 $V-A$ 估算模型更能较好地进行体积估算, 在现实调查或遥感影像估算中, 若横断面面积难以获取时, 也可使用切沟长度作为估算切沟体积模型的有效参数。

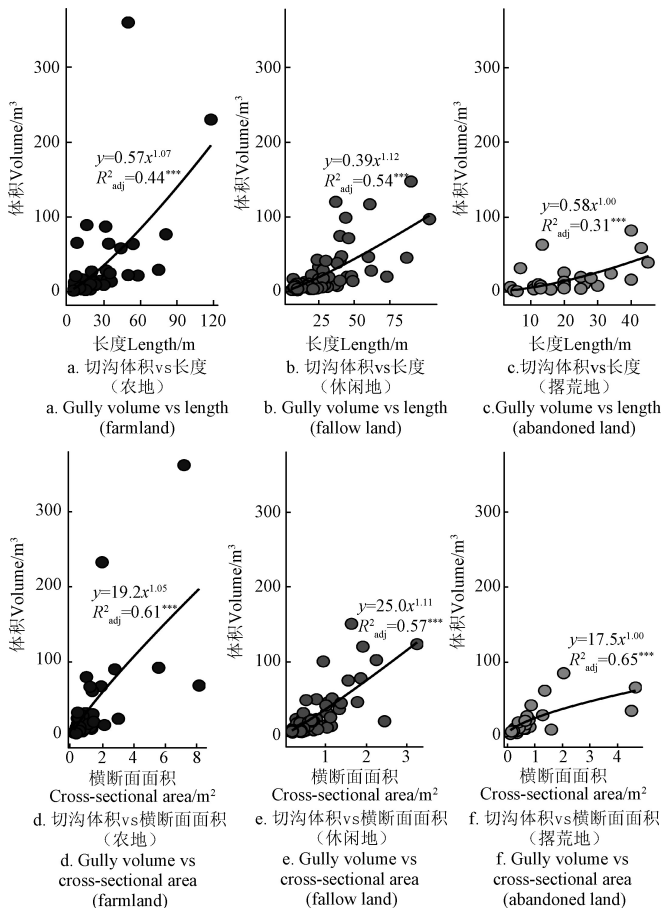


图 6 岔巴沟流域切沟侵蚀体积与形态参数之间的关系

Fig.6 Relationship between gully erosion volume and morphological parameters in Chabagou watershed

3 讨论

3.1 特大暴雨作用下切沟侵蚀影响因素

切沟作为一种常见的地表形态, 其影响因素可以归纳为内部因素和外部因素, 内部因素包括土壤性质、地形地貌和土地利用类型等; 外部因素是指突然触发切沟侵蚀的事件, 包括降雨、冻融以及人类活动等^[28]。首先,

降雨提供了切沟侵蚀最主要的侵蚀动力, 通过沟头溯源侵蚀, 沟底下切, 沟岸扩展、崩塌、陷穴等作用形式, 导致土壤分离、搬运和沉积, 不断切割坡面形态, 造成土壤流失^[29]。研究表明, 不同土地利用类型坡面对径流的抵抗能力差异显著, 植被的存在增强了土壤抗冲性^[30]。尤其是在黄土高原地区, 由于黄土的结构性、湿陷性和水敏性等特殊土壤性质, 裸露的农地在暴雨作用下更易形成沟蚀。坡度和坡长是影响切沟发育的关键地形因素, 直接影响切沟的上方汇水条件^[31]。坡度的增加可以迅速形成径流, 径流在下坡段快速汇水, 导致径流侵蚀能力增加, 加剧了切沟的纵向切割率^[32]。而坡形是坡度和坡长的组合形态, 决定径流的汇集形式和过程, 进而影响坡面切沟侵蚀发育。对于凹坡而言, 径流易集中而形成股流, 野外调查发现瓦背状地形的凹洼部分, 切沟分布相对于凸坡部位密集且侵蚀量大。另外, 在汇水面积一定时, 切沟断面受植被因子限制而自发地调整形态和尺寸, 一般来说, 植被的存在可抑制切沟的发育。一方面, 农地退耕为草地或林地增加了土壤有机质含量、促进土壤团聚体稳定并降低土壤可蚀性^[27], 降雨作用下撂荒地具有更强的抗冲性并通过削弱径流动能来抑制切沟形成^[33]。另一方面, 植被根系发育易形成土壤大孔隙, 并产生优先渗流路径, 在特大暴雨条件下, 植被的存在可能会促进沟岸泻溜、崩塌、滑坡等重力侵蚀的发生, 使植被对切沟沟岸发育的抑制作用失效^[26]。

退耕还林 (草) 后的黄土高原地区在应对特大暴雨事件时的水土流失防护还存在诸多问题。1) 在调查的 12 个小流域中, 依然存在大面积陡坡耕作现象, 建议陡坡农地继续实施退耕政策并合理配置土地利用类型, 鼓励农民开展生态农业等农业模式。2) 对于已退耕的撂荒地, 需实施完善的管理措施, 避免复耕现象; 其次, 开展各项调配坡面径流措施, 完善排水系统, 形成一套综合防护体系。3) 遏制浅沟再发育, 浅沟提供了继续发育成切沟的良好基础, 避免集中径流经过浅沟, 防止进一步发育成切沟。

3.2 特大暴雨作用下切沟侵蚀对植被恢复的响应

以实地测量的切沟形态参数为自变量建立的体积估算模型, 对大时空尺度上进行切沟侵蚀定量研究有重要意义^[34]。本研究表明, 暴雨作用下不同土地利用类型坡面形成的切沟体积分别随沟长、横断面面积的增长以幂函数形式增加 ($V=aL^b$ 、 $V=a'A^{b'}$), 其中 $V-L$ 模型的 a 和 a' 为模型拟合参数, b 值被视为单位沟长上切沟横断面面积的增长率^[35], b 值接近 1 表明切沟横断面面积沿沟长方面近乎变化一致, 本研究得出的草地 b 值在约为 1, 而农地和休闲地大于 1, 这说明植被在控制切沟形态变异方面可能具有优势^[7]。而 $V-A$ 模型的 b' 值被视为单位切沟面积上沟深的增长率, b' 越接近于 1 表明从沟头到沟口的沟深越趋于恒定。在特大暴雨作用下, 具有强大冲刷能力的径流使得切沟从沟头到沟口都有充沛的径流能量去下切土体, 导致不同坡段的沟深并没有明显差异, 这是 b' 值接近 1 的重要原因。由调整后的决定系数可知 (图 6),

模型 $V-A$ 比 $V-L$ 在预测切沟体积上有更好的表现, 与吴红艳^[36]在相同地区的研究结果一致。然而, 在云南元谋干热河谷区, 用沟长进行预测相对于用横断面面积预测切沟体积更具有优势^[6]。因此, 估算切沟体积的有效参数还应根据特定情况而定。

植被常被看作抑制切沟发育的关键因子, 当植被覆盖度大于 60% 时能有效地抑制切沟的发育^[3], 本研究结果也证实了植被恢复能有效减少切沟侵蚀量 (图 3d)。需要注意的是, 当植被恢复后的小流域在遭受特大暴雨时极易触发重力侵蚀, 植被根系的纵向根劈作用促进了崩塌、滑塌的发生^[5], 如 2013 年黄土高原天水地区“7·25”暴雨在植被覆盖度良好的坡面上引发重力侵蚀灾害 700 多处^[37]。重力侵蚀产沙最高可占流域总侵蚀产沙量的 67.0%^[22]。另外, 暴雨作用下坡面的陷穴侵蚀也同样不可忽视。陷穴侵蚀被认为是切沟侵蚀的一个重要过程, 特别是在植被存在的情况下, 植被通过促进壤中流和优先流的形成而加速土壤颗粒分离来促进陷穴侵蚀。但由于在发生凹陷或通道坍塌之前, 陷穴侵蚀无法从地表可见, 因此在切沟侵蚀过程中, 陷穴侵蚀常常被忽视^[38-39] (图 7)。尽管植被恢复以及梯田等措施能在一般降雨情况下发挥良好的减水减沙能力^[20], 然而, 针对于特大暴雨情况, 如何在适宜的部位布设引水/拦沙措施来减轻沟坡重力侵蚀以及陷穴侵蚀的危害, 是土壤侵蚀研究中值得重视的问题。

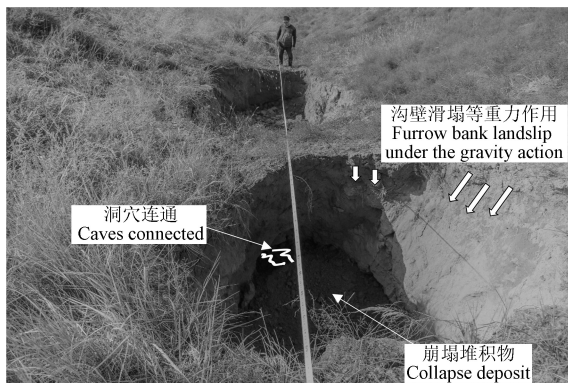


图 7 岔巴沟流域坡面洞穴侵蚀

Fig.7 Siping erosion in slope of Chabagou watershed

4 结 论

本研究以陕北“7·26”特大暴雨作用下岔巴沟流域新形成的切沟为研究对象, 通过对其中 12 个小流域不同土地利用类型 (农地、休闲地和撂荒地) 坡面切沟侵蚀调查, 研究了不同土地利用类型坡面切沟发育形态特征及其体积估算模型。结果表明: 1) “7·26”特大暴雨下, 农地、休闲地和撂荒地切沟侵蚀长度在 20 m 内的占比分别为 55.6%、34.8% 和 44.8%, 深度分布在 100 cm 以上的占比分别为 40.0%、33.3% 和 41.4%; 农地切沟平均深度为 110 cm, 分别比休闲地和撂荒地高 18.3%、19.2%; 农地和休闲地切沟平均宽深比分别为 0.87 和 0.84, 横断面呈“宽-浅型”, 而撂荒地切沟呈“方型” (宽深比 1.01)。

2) 撂荒地切沟侵蚀体积最小, 分别比农地和休闲地降低 47.8% 和 28.3%; 农地切沟不同坡段侵蚀体积为下坡

最大、上坡次之、中坡最小, 而休闲地和撂荒地切沟侵蚀体积沿坡长方向呈递增趋势。

3) 农地、休闲地和撂荒地切沟侵蚀体积均与切沟长度、断面面积呈极显著幂函数关系 ($P < 0.001$), 横断面面积是进行体积估算更为有效的参数。

[参 考 文 献]

- [1] 张文杰, 程维明, 李宝林, 等. 黄土高原丘陵沟壑区切沟侵蚀与地形关系分析: 以纸坊沟流域为例[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 87-94.
Zhang Wenjie, Cheng Weiming, Li Baolin, et al. The relationship between gully erosion and geomorphological factors in the hill and ravine region of the Loess Plateau[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(1): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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)
- [3] 杨松, 张岩, 阿尼克孜·肉孜, 等. 陕北黄土区植被恢复对切沟发育速率的影响[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(4): 18-25.
Yang Song, Zhang Yan, Anikezi Rouzi, et al. Effects of vegetation restoration on gully development rates in Northern Shaanxi[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(4): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [4] 胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 725-733.
Hu Chunhong, Zhang Xiaoming, Zhao Yang. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 725-733. (in Chinese with English abstract)
- [5] 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 等. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 159-167.
Jiao Juying, Wang Zhijie, Wei Yanhong, et al. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe Watershed based on field measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 159-167. (in Chinese with English abstract)
- [6] Dong Yifan, Xiong Donghong, Su Zheng'an, et al. Critical topographic threshold of gully erosion in Yuanmou Dry-hot Valley in Southwestern China[J]. Physical Geography, 2013, 34(1): 50-59.
- [7] Zucca C, Canu A, Della P R. Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia (Italy)[J]. Catena, 2006, 68: 87-95.
- [8] 梁伟, 白翠霞, 孙保平, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)区土壤水分-物理性质研究[J]. 中国水土保持, 2006(3): 17-18.
Liang Wei, Bai Cuixia, Sun Baoping, et al. Study on soil moisture - physical properties of returning cultivated land to forest (grass) in hilly and gully Loess Region[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(3): 17-18. (in Chinese with English abstract)
- [9] Yuan Mutian, Zhang Yan, Zhao Yiyang, 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.
- [10] Wang ZhiJie, Jiao Juying, Rayburg Scott, 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.
- [11] 速欢, 王文龙, 康宏亮, 等. 露天矿排土场平台-边坡系统侵蚀形态及径流产沙特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3194-3206.
- Su Huan, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Erosion morphology and runoff and sediment yielding characteristics of platform-slope system in opencast coal mine[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 3194-3206. (in Chinese with English abstract)
- [12] 董一帆, 伍永秋. 利用虚拟插钎对切沟沟底不同部位短期变化的初步研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(6): 892-897.
- Dong Yifan, Wu Yongqiu. Short-term gully erosion at different places of bottom of gully using virtual erosion pins[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(6): 892-897. (in Chinese with English abstract)
- [13] Li Zhen, Zhang Yan, Zhu Qingke, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area[J]. *Catena*, 2016, 148: 195-203.
- [14] 李镇, 张岩, 尚国珩, 等. 晋西黄土区切沟断面特征及体积估算模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 152-159.
- Li Zhen, Zhang Yan, Shang Guotao, et al. Characterizing gully cross section and modeling gully volume in hilly loess region of western Shanxi Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(6): 152-159. (in Chinese with English abstract)
- [15] Guo Mingming, Yang Bo, Wang Wenlong, et al. Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China[J]. *Geomorphology*, 2019, 345: 106847.
- [16] 王志强, 杨萌, 张岩, 等. 暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 129-135.
- Wang Zhiqiang, Yang Meng, Zhang Yan, et al. Rill erosion of long and steep cropland on the Loess Plateau under heavy rainstorm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(12): 129-135. (in Chinese with English abstract)
- [17] Yang Bo, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Soil erosion of unpaved loess roads subjected to an extreme rainstorm event: a case study of the Jiuyuangou watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(6): 1396-1407.
- [18] 郭晋伟, 何亮, 裴志林, 等. 极端暴雨条件下黄土高原水平梯田损毁情况调查分析: 以岔巴沟流域“7·26”特大暴雨为例[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 107-113.
- Guo Jinwei, He Liang, Pei Zhilin, et al. Investigation and analysis of damage of horizontal terraced fields under extreme rainstorm conditions in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
- [20] 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. Analysis of the effect of water and soil conservation measures on storm water and sediment reduction of the flood on July 26, 2017[J]. *Yellow River*, 2017, 39(12): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王道席, 侯素珍, 杨吉山, 等. 无定河“7·26”暴雨洪水泥沙来源分析[J]. *人民黄河*, 2017, 39(12), 18-21.
- Wang Daoxi, Hou Suzhen, Yang Jishan, et al. Analysis of the sediment source of the flood formed by July 26 rainstorm in the Wuding river basin[J]. *Yellow River*, 2017, 39(12): 18-21. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨吉山, 姚文艺, 郑明国, 等. 岔巴沟淤地坝小流域重力侵蚀产沙量分析[J]. *水利学报*, 2017, 48(2): 241-245.
- Yang Jishan, Yao Wenyi, Zheng Mingguo, et al. Analysis on gravitational sediment yield in the check-dam controlled basins of Chabagou Watershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(2): 241-245. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴志勇, 侍恒, 何海, 等. 岔巴沟流域植被变化特征及其对水沙的影响[J]. *水资源保护*, 2020, 36(1): 31-37.
- Wu Zhiyong, Shi Heng, He Hai, et al. Characteristics of vegetation change and impact on runoff and sediment in Chabagou watershed[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1): 31-37. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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, Zhang 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)
- [25] 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.
- Wang Nan, Chen Yixian, Bai Leichao, et al. Investigation on soil erosion in small watersheds under “7·26” extreme rainstorm in Zizhou country, northern Shaanxi province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 338-344. (in Chinese with English abstract)
- [26] Frankl A, Poesen J, Scholiers N, et al. Factors controlling the morphology and volume (V)-length (L) relations of permanent gullies in the northern Ethiopian Highlands[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14): 1672-1684.
- [27] 陈卓鑫, 王文龙, 郭明明, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 387-398.
- Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility on different geomorphological locations in the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 387-398. (in Chinese with English abstract)
- [28] Li Zhen, Zhang Yan, Zhu Qingke, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 462-469.
- [29] 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 Science and Engineering*, 2000, 8(2): 134-142. (in Chinese with English abstract)
- [30] Martínez-Casasnovas J A, Ramos M C, García-Hernández D. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (Northeast Spain)[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(14): 1927-1937.
- [31] He Jijun, Sun Liying, Gong Huili, et al. The characteristics of rill development and their effects on runoff and sediment yield under different slope gradients[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(3): 397-404.
- [32] Ran Hong, Deng Qingchun, Zhang Bin, et al. Morphology and influencing factors of rills in the steep slope in Yuanmou Dry-Hot Valley (SW China)[J]. *Catena*, 2018, 165: 54-62.
- [33] Han Jianqiao, Ge Wenyan, Hei Zhe, et al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by

- extreme rainstorms[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 301: 107047.
- [34] 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)
- [35] Kompani-Zare M, Soufi M, Hamzehzarghani H, et al. The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran[J]. Catena, 2011, 86(3): 150-159.
- [36] 吴红艳. 黄土丘陵区发育活跃期切沟形态特征与转换模型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Wu Hongyan. Active Gully Morphological Characteristics and Transform Models in the Loessial Hilly-Gully Region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [37] 于国强, 张茂省, 胡炜. 天水市“7.25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. 西北地质, 2014, 47(3): 185-191.
Yu Guoqiang, Zhang Maosheng, Hu Wei. Analysis on the development characteristics and hydrodynamic conditions for the massive debris flow in Tianshui[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(3): 185-191. (in Chinese with English abstract)
- [38] Holden J. Sediment and particulate carbon removal by pipe erosion increase over time in blanket peatlands as a consequence of land drainage[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2006, 111: F02010.
- [39] Xu Ximeng, Wilson Glenn V, Zheng Fenli, et al. The role of soil pipe and pipeflow in headcut migration processes in loessic soils[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(8): 1749-1763.

Gully development characteristics of the slopes for different land-use types under extreme rainstorms

Chen Zhuoxin¹, Wang Wenlong^{1,2*}, Kang Hongliang¹, Yang Bo³, Zhao Man⁴, Wang Wenxin¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China; 4. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Gully erosion has been considered as one of the main forms of soil erosion on the Loess Plateau of China. To control soil and water loss and improve the eco-environmental quality of the Loess Plateau, the Chinese government implemented the “Grain for Green” project in 1999 to restore vegetation on steep slope farmlands. Although the project has been implemented for two decades, soil erosion on the loess hilly region caused by extreme rainstorms is still serious. Therefore, the controlled effects of vegetation restoration on gully formation and soil erosion on loess hillslopes under extreme rainstorms need to be evaluated. Moreover, the effect of land use change on the morphology of gullies and gully volume estimation under extreme rainstorms is poorly understood. Given these issues, the Chabagou watershed (a typical watershed in the Loess Plateau of China) suffered by an rainstorm (called “7·26” rainstorm) was selected as the study area of gully erosion. Four small basins in the Chabagou watershed were selected from the upper, middle, and lower reaches, respectively, to explore the morphological characteristics and derive volume estimation models of three land uses (farmland, fallow land, and abandoned land) under extreme rainstorm. A total of 140 gullies were investigated, including 45 gullies on farmland, 66 gullies on fallow land and 29 gullies on abandoned land. The gully length was measured by the laser rangefinder and the gully was divided into three sections (upper, middle and lower) by a 50-m tape. In each section, the top width, bottom width and the depth of the gully were measured using a steel tape. The measuring times was adjusted according to the gully length to ensure the measuring accuracy. The measured cross-sectional parameters (i.e. width and depth) of the three sections were averaged as the eventual width and depth of each section, and the gully volumes of the three sections were summarized to be the amount of gully erosion. The results showed that: 1) the gullies less than 20 m on farmland, fallow land and abandoned land accounted for 55.6%, 34.8% and 44.8%, respectively. The averaged gully depth on farmland was 110 cm, which was 18.3%, and 19.2% higher than those on fallow land and abandoned land, respectively. The width-depth ratios of gully on farmland and fallow land were 0.87 and 0.84, respectively, and their cross sections were characterized by the wide and shallow shape, but the crossed section of the gully on abandoned land was closed to squared shape (width-depth ratio was 1.01). 2) The lowest gully erosion volume was found on abandoned land, which was 47.8% and 28.3% lower than that of farmland and fallow land, respectively, indicating that vegetation restoration can effectively contain gully erosion under extreme rain. 3) Gully erosion volume of farmland on upslope was largest, followed by downslope and mid-lope, while fallow land and abandoned land showed an increasing trend along the slope. For the three types of land use, the widening rate of gully on the upslope was greater than that on the downslope, but the opposite was found on the mid-slope. 4) The significant ($P < 0.001$) power functions could express the relationships between gully erosion volume and gully length and/or gully cross-sectional area on farmland, fallow land, and abandoned land, and the cross-sectional area was a more effective parameter for estimating gully volume. This study results can provide important information for predicting the gully erosion of different land use types and controlling gully erosion in the hilly area of the Loess Plateau.

Keywords: land use; erosion; slopes; extreme rainstorms; gully; vegetation restoration; Loess Plateau