

暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征

王志强¹, 杨萌², 张岩^{2*}, 张帅¹

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京林业大学水土保持学院,
水土保持与荒漠化防治国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 细沟侵蚀是黄土高原坡耕地侵蚀的重要形式, 已有的坡耕地细沟研究成果主要集中于裸土细沟侵蚀特征及其发生机制的小区或水槽试验, 极端暴雨条件下细沟侵蚀观测很少, 对于田间细沟侵蚀的预报仍然缺少实用的方法。该研究旨在基于实地测量数据, 分析极端暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征。2017 年无定河流域“7.26”暴雨后, 在暴雨中心附近选择 15 个样地进行细沟侵蚀测量, 结合 Google 影像和无人机航拍影像, 调查分析不同类型坡耕地细沟侵蚀特征。研究结果表明: 1) 暴雨条件下坡耕地是坡面细沟侵蚀的主要地类。长陡坡裸露坡耕地侵蚀模数为 22 478 t/km², 坡长 20 m 时, 约为种植作物的平作坡耕地的 1.5 倍, 且坡长越长, 差异越大。等高垄作能够有效减少细沟侵蚀。撂荒坡耕地细沟侵蚀模数仅为裸露坡耕地的 12%, 草地未发现细沟侵蚀。2) 幂函数可以很好地拟合细沟侵蚀模数与坡长的关系, 裸露坡耕地坡长指数为 0.831。暴雨强度越大, 坡长指数也越大。3) 上坡来水在坡耕地上造成了严重的细沟侵蚀, 与地块上承接的降水相比, 上坡来水对细沟侵蚀的影响更大。坡面浅沟汇水明显减小细沟侵蚀强度, 浅沟发育程度越高, 细沟侵蚀强度就越小。该研究可为估算黄土高原丘陵区不同类型坡耕地的细沟侵蚀提供重要参考。

关键词: 土壤; 侵蚀; 暴雨; 细沟; 坡耕地; 坡长; 坡度; 上坡来水

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.12.016

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-12-0129-07

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.12.016 http://www.tcsae.org

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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.12.016 http://www.tcsae.org

0 引言

细沟侵蚀是地表径流在一定的斜坡上集中到一定量以后, 将地面刻划成一些微细的沟纹^[1], 是坡面侵蚀的主要形式, 对坡耕地坡面侵蚀量的贡献可达 70%以上^[1-6]。细沟侵蚀是满足某种临界条件下发生的一种复杂土壤侵蚀过程, 影响细沟侵蚀的最直接因素是降雨径流侵蚀力和土壤抗侵蚀力, 其他如地形、土壤表面特征、土地管理等因素则是通过削弱或者加强这两类因素而对细沟侵蚀产生影响^[7]。人工降雨试验表明细沟长度和深度随降雨强度的增加而增加^[8], 细沟侵蚀速率随着降雨强度和坡度的增加呈幂函数增加, 坡度对细沟侵蚀的影响大于其对坡面侵蚀的影响^[9], Shen 等^[5]研究显示雨强的影响大于坡度的影响。但是, 陡坡条件下的试验研究表明坡度的影响大于雨强的影响^[10]。试验研究还表明降雨强度和坡长都会影响细沟侵蚀与坡度的定量关系^[11]。郑粉莉等^[3]认为坡长对细沟侵蚀的影响比较复杂, 在不同的坡度和坡型

条件下, 细沟侵蚀沿坡长的变化规律不一致。因此, 降雨强度、坡度和坡长对于细沟侵蚀的影响存在复杂的交互作用。野外调查还发现坡耕地发生细沟侵蚀的一个重要原因是上方汇水的作用^[12]。人工降雨试验研究也证实了上方汇水对细沟侵蚀的影响^[13-14]。由此可见, 细沟侵蚀的影响因素错综复杂, 机制尚不明确。

研究表明直形坡坡度和坡长与细沟侵蚀模数之间具有良好的经验关系^[15-19]。细沟侵蚀模数与坡度和坡长都呈幂函数关系。Govers^[17]在耕地的调查结果表明坡度指数变化范围在 0.42~3.47 之间。如果不区分细沟侵蚀和细沟间侵蚀, 坡面侵蚀的坡长指数可以变化在 0~0.9 之间^[20]。在易于发生细沟侵蚀的陡坡, 坡长指数值大于 0.5^[21]; 如果以细沟侵蚀为主, 该值接近 1, 如果以细沟间侵蚀为主, 该值则接近 0^[22]。坡长指数的大小还受到坡度的影响^[23], 并随降雨强度的增加而增加^[24-25]。Govers^[26]综述了前人的研究, 得到细沟侵蚀的坡长指数为 0.71。但是, 在不同观测或试验条件下得到的研究结果有很大差异。Govers 得到长缓坡细沟侵蚀坡长指数为 (0.75±0.25)^[17]。而 McCool 等^[20]测量有植被覆盖的情况下细沟侵蚀的坡长指数平均为 0.5。可见, 不同条件下坡面细沟侵蚀的坡长指数变化较大。

前人的研究多是在野外径流小区或室内人工降雨条件下的观测结果, 而极端暴雨条件下坡长超过 20 m 且坡度在 30°以上的长陡坡细沟侵蚀随坡长的变化特征

收稿日期: 2020-03-06 修订日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671272) 和国家重点研发计划 (2016YFC0501604-05) 联合资助

作者简介: 王志强, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤侵蚀和水土保持。

Email: wangzhiqiang@bnu.edu.cn

*通信作者: 张岩, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为土壤侵蚀和水土保持。Email: zhangyan9@bjfu.edu.cn

还不明确。人工降雨试验条件有限（坡长较短），上坡来水对长陡坡细沟侵蚀的影响也有待野外实测数据的进一步印证。在自然降水的条件下，实地调查极端暴雨造成的细沟侵蚀，既是对室内人工降雨试验的有益补充，也可以用于检验已有研究结果。本研究利用 2017 年无定河流域“7.26”极端暴雨引发的严重细沟侵蚀的实地调查数据，分析黄土高原丘陵区长陡坡条件下坡耕地细沟侵蚀的变化特征以及细沟侵蚀对方来水和坡面浅沟的响应，以期对不同坡耕地的细沟侵蚀估算提供重要参考。

1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵沟壑区第一副区，沟壑密集，支离破碎，梁峁起伏，地面切割较深。多年年平均气温为 9.1℃。多年平均降水量 428.1 mm。2017 年 7 月 25—26 日无定河流域中下游发生特大暴雨（后文简称 7.26 暴雨），距离研究区最近的雨量站曹坪站记录的 7.26 暴雨的降雨量为 212.4 mm，最大 1 h 降雨量 49.2 mm，平均降雨强度 0.25 mm/min，造成了严重的土壤侵蚀，包括在坡耕地上引发细沟侵蚀。由于 2017 年 7.26 暴雨前研究区最大的日降水只有 16.4 mm，加上中耕的作用，可以认定坡耕地细沟侵蚀由 7.26 暴雨所致。

2 材料与方法

2.1 野外调查与样地选择

2017 年 8 月 9—16 日，在临近暴雨中心的陕西省子洲县北部的清水沟小流域（E105°42′，N35°33′，面积

5.73 km²）和蛇家沟小流域（E109°58′，N37°41′，面积 4.93 km²）进行了细沟侵蚀测量。调查样地主要分布在清水沟小流域，并以蛇家沟为补充，主要考虑到清水沟小流域坡耕地较多，而且 7.26 暴雨造成严重的水土流失，导致清水沟小流域水库溃坝。样地的选择考虑 4 个因素。首先，以直形坡为主，选择不同作物类型和覆盖度的 8 个 20 m×5 m 的样地；其次，选择清水沟和蛇家沟地块最长的坡耕地样地各 1 块；再次，为了对比不同条件下的坡耕地：选择撂荒坡耕地样地 1 块，有浅沟分布的样地 2 块，另外，分别在清水沟和蛇家沟各选 1 块草地样地作为对照，共计 15 块样地。根据江忠善等的研究结果^[27]，植被覆盖度小于 10% 的人工草地侵蚀模数接近于对照裸露农地的侵蚀模数，因此，把覆盖度小于等于 10% 的 2 块坡耕地作为裸露坡耕地。各样地的具体情况见表 1。在细沟侵蚀调查过程中，首先利用 Google 卫星影像（拍摄日期 2017 年 5 月 12 日，暴雨前 2 个月）确定坡耕地所在位置。使用手持 GPS 测量并记录样地的经纬度，并在 Google 卫星影像标注样地位置。使用地质罗盘测量坡度和坡向，现场调查并记录作物种类，采用目估法测量植被覆盖度，在样方内每隔 2 m 布设一个断面，由坡上到坡下依次量取各断面内细沟的宽度、深度以及相邻细沟间的距离。根据朱显谟先生提出的土壤侵蚀分类方法^[1]，细沟的纵断面和斜坡表面一致，沟深以 10~15 cm 为主，沟宽约<10~15 cm；而浅沟的沟深约在 0.5~1 m，沟宽 1 m 为主；切沟主要发育在成土母质上，沟深 2~3 m，沟宽约 1~5 m。本文调查的坡耕地样地未发现切沟侵蚀，但在 2 块 44 m×14 m 的大样方上有浅沟发育（表 1）。

表 1 细沟侵蚀样地布设
Table 1 Sampling sites for rill erosion survey

样地类型 Site types	编号 Code	长×宽 Size/(m×m)	坡度 Slope/(°)	作物种类 Crop types	植被盖度 Coverage/%	上坡集水区		耕作方式 Tillage pattern
						SL/m	VT	
裸露坡耕地 Bare sloping cropland	Q1	20×5	31	红小豆	10	20	草地	平作
	Q2	36×5	34	黑豆	5	0	-	平作
	Q3	20×5	27	绿豆	40	7	耕地	平作
	Q4	20×5	30	谷子	20	15	耕地	平作
	Q5	20×5	30	谷子	30	10	耕地	平作
作物坡耕地 Sloping cropland	Q6	20×5	35	谷子	20	38	草地	平作
	Q7	20×5	31	谷子	40	24	草地	平作
	S1	20×5	32	糜子	25	0	-	平作
	S2	20×5	38	绿豆	35	0	-	平作
	S3	46×5	30	样地上部（谷子） 样地下部（豇豆）	35（谷子） 20（豇豆）	0	-	样地上部（等高垄作） 样地下部（平作）
	Q8	44×14	34	样地上部（谷子）	65（谷子）	57	耕地、草地	平作
	Q9	44×14	31	样地下部（谷子、马铃薯） 谷子	45（马铃薯） 40	59	耕地、草地	平作
	S4	20×5	35	茵陈蒿	65	36	草地	撂荒 1 a
撂荒坡耕地 Fallow sloping cropland								
草地 Grassland	Q10	20×5	35	白莲蒿、茵陈蒿、草木樨状 黄芪、胡枝子等	65（植被冠层） 70（生物土壤结皮）	14	草地	-
	S5	20×5	35		50（植被冠层） 80（生物土壤结皮）	36	草地	-

注：“7.26”暴雨发生后的 13~21 d 进行测定，样地均未扰动。“7.26”暴雨前样地 Q8 和 Q9 内有浅沟发育。SL 为上坡集水区坡长，VT 为植被类型。
Note: Survey was conducted on Aug. 9-16, 2017, 13-21 days after the “7.26” rainstorm, and all sampling sites were undisturbed. There is an ephemeral gully and a ditch in the sampling site before the “7.26” rainstorm. SL is upslope length and VT is vegetation type.

2.2 细沟侵蚀模数的计算

根据调查的细沟宽度和深度, 进一步计算每个样方内每个断面的细沟侵蚀模数。根据野外观察, 细沟横断面主要为箱形, 细沟体积、侵蚀量、侵蚀模数采用容积法进行计算^[28]。具体计算公式如下:

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot H_i)}{D} \cdot \rho_b \times 10^4$$

式中 Er 为断面细沟侵蚀模数, t/km^2 ; W_i 为断面上第 i 条细沟的沟宽, cm ; H_i 为断面上第 i 条细沟的沟深, cm ; n 为断面上的细沟条数; D 为断面宽度, cm , ρ_b 为土壤容重, 根据前人的测量结果^[29-30], 坡耕地土壤容重取 $1.20 g/cm^3$ 。在各个断面细沟侵蚀模数的基础上, 进一步计算每块样地不同坡长 (水平投影坡长) 上所有断面的平均侵蚀模数。

2.3 地貌因子获取

样地的坡度和实际坡长通过实地测量获取。实际坡长是测量断面距离耕地上边界的距离, 水平投影坡长通过实际坡长和坡度计算得到。根据实地观察, 记录样地是否受到上坡来水影响。如果样地上坡来水沿着一侧流走, 并未影响调查样地, 上坡来水坡长则记为 0。对于有上坡来水的样地, 基于无人机航拍影像生成的 DSM, 使用 Arcgis 的水文分析模块提取每个样地的上坡集水面积, 并测量上坡集水区坡长。首先, 使用 1:1 万地形图对无人机航拍影像进行几何校正后生成 DSM, 其次, 根据实地调查记录准确勾绘样地位置, 生成栅格图层, 然后, 使用 DSM 生成调查区域的流向栅格图层与样地图层再提取每块样地的上坡集水区, 测量上坡集水区坡长。蛇家沟小流域无人机影像拍摄于 2017 年 10 月 14 日, 使用型号为 Ebee plus RTK 的固定翼无人机, 分辨率为 0.19 m; 清水沟小流域无人机影像及 DSM 拍摄于 2018 年 8 月 6 日, 使用型号为“悟” Inspire 2 的旋翼无人机, 分辨率为 0.20 m。

2.4 数据统计与分析

在计算每块样地每个测量断面对应的投影坡长和平均侵蚀模数的基础上, 使用 Origin 2017 分别拟合细沟侵蚀模数与坡长的函数关系, 并绘制统计图表。

3 结果与分析

3.1 裸露和作物坡耕地细沟侵蚀量随坡长的变化

实测裸露坡耕地 (覆盖度 $\leq 5\%$) 细沟侵蚀模数高达 $22\,478 t/km^2$ 。幂函数可以很好地拟合细沟侵蚀模数与坡长的关系, 坡长指数为 0.831 (表 2)。相同坡长条件下, 王玉宽报告的细沟侵蚀模数^[4]明显小于本次调查结果, 而且坡长越长, 差异越大 (图 1)。图 1a 显示: 根据王玉宽 1988 年的调查数据, 在 1988 年 139 mm 降水量的条件下, 坡长指数略小于本次拟合结果。根据王玉宽 1989 年的调查数据, 在 1989 年 105 mm 降水量条件下, 坡长指数较大, 主要是在坡长为 20 m 时, 1988 和 1989 年的细沟侵蚀模数差异较大, 导致使用这 2 个年份数据拟合的幂函数曲线形状发生变化, 坡长指数激增到 1.242。结合实地观察和图 1a 呈现的这种现象可以推测: 如果坡面存

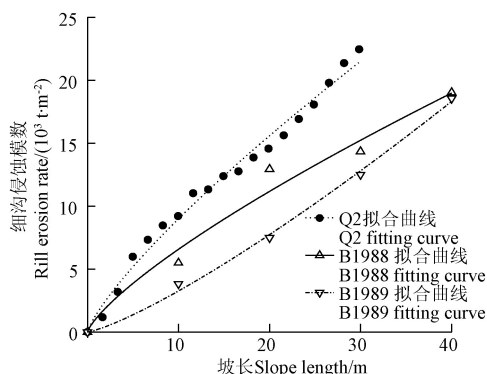
在异质性, 使得局部细沟侵蚀强度较低, 径流能量没有消耗, 可能在下坡造成较强的侵蚀补偿。综合 2 次调查结果来看, 暴雨强度越大, 坡长指数越大, 即细沟侵蚀模数随坡长增加的幅度越大。

表 2 细沟侵蚀模数与坡长的幂函数回归方程

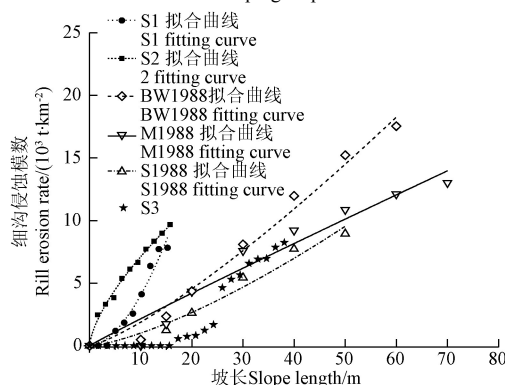
Table 2 Power functions fitted between rill erosion and slope length

样地类型 Site type	样地编号 Site No.	回归方程 Regression model	R^2	P
裸露坡耕地 Bare sloping cropland	Q2	$Er=1679.5L^{0.831}$	0.982	<0.001
	B1988**	$Er=1131.6L^{0.764}$	0.970	<0.001
	B1989**	$Er=187.37L^{1.242}$	0.997	<0.001
作物坡耕地 Sloping cropland	S1	$Er=64.15L^{1.800}$	0.968	<0.001
	S2	$Er=1532.54L^{0.667}$	0.994	<0.001
	S1988**	$Er=41.05L^{1.392}$	0.965	<0.001
	M1988**	$Er=236.74L^{0.960}$	0.960	<0.001
	BW1988	$Er=102.27L^{1.266}$	0.986	<0.001

注: Er 为断面细沟侵蚀模数, t/km^2 ; L 为断面坡长, m。*样地数据来自王玉宽等研究^[4], 1988 年 8 月 4—5 日, 2 场暴雨间隔 19 h, 总降水量 139 mm, 第二场降水量 56.4 mm, 历时 71 min, 平均雨强 0.794 $mm \cdot min^{-1}$ 。1989 年 7 月 16 日, 降水量 105.3 mm, 平均雨强 0.117 $mm \cdot min^{-1}$, 60 min 最大雨强 0.733 mm/min 。样地 S1988 为平作黄豆, 坡度 $22^\circ \sim 34^\circ$, 坡长 50 m; 样地 M1988 为水平沟谷子, 坡度 $23.5^\circ \sim 32^\circ$, 坡长 70 m; BW1988 为平作荞麦, 坡度 $18^\circ \sim 30^\circ$, 坡长 60 m; B1988 和 B1989 为裸露坡耕地, 坡度 30° , 坡长 40 m。
Note: Er is rill erosion rate at cross-section, t/km^2 ; L is slope length of cross-section, m. By Wang^[4]. In Aug 4-5, 1988, total rainfall 139 mm of two events with 19h interval and rainfall intensity of the second event was 0.794 $mm \cdot min^{-1}$ within 71 min. In July 16, 1989, total rainfall was 105.3 mm and the maximum 60 min rainfall intensity was 0.733 $mm \cdot min^{-1}$. S1988 was *Glycine max* (Linn.) Merr. with flat planting on 50 m-long slope of $22^\circ \sim 34^\circ$, M1988 was *Setaria italic* in contour trenches on 70 m-long slope of $23.5^\circ \sim 32^\circ$, BW1988 was *Fagopyrum esculentum Moench* with flat planting on 60 m-long slope of $18^\circ \sim 30^\circ$, and B1988 and B1989 were bare cropland on 40 m-long slope of 30° .



a. 裸露坡耕地
a. Bare sloping cropland



b. 作物坡耕地
b. Sloping cropland

图 1 裸露坡耕地和作物坡耕地细沟侵蚀量随坡长的变化
Fig.1 Changes of rill erosion rate with slope length on bare sloping cropland and sloping cropland

2 块平作的坡耕地地块 S1 和 S2 (图 1b) 细沟侵蚀明显小于裸露农地 Q2 (图 1a), 样地平均侵蚀模数分别是 7 822 和 9 684 t/km^2 。幂函数拟合的细沟侵蚀模数随坡长的变化表明坡长指数差异很大, 但只是 2 个地块在坡长较短的情况下, 侵蚀强度差异较大, 当投影坡长为 15 m 左右, 二者的侵蚀模数接近, 出现了与裸地类似的下坡侵蚀补偿现象, 而这种现象对坡长指数的拟合值影响较大。地块 S3 上部的 30 m (投影坡长 26 m) 为等高垄作, 下部 16 m 为平作, 在 18 m 前未发现细沟侵蚀, 但是, 30 m 后平作坡耕地细沟侵蚀急剧增加 (图 1), 虽然平均侵蚀模数小于 S1 和 S2 2 个平作地块, 但是已经相当于王玉宽调查的作物坡耕地细沟侵蚀强度^[4]。可见, 在暴雨条件下, 等高垄作能够减少局部细沟侵蚀, 但是未能消耗的径流能量仍然会造成下坡土壤侵蚀。另外, 综合王玉宽调查结果^[4]和本次调查结果, 作物坡耕地坡长指数一般高于裸露坡耕地, 变化范围在 0.67~1.80 之间, 表明坡长越长细沟侵蚀随坡长增加的幅度越大, 换言之, 坡长越长, 作物抑制细沟侵蚀的效果越差。与种植作物和裸露的坡耕地相比, 撂荒 1a 的坡耕地 (无上方来水) 平均侵蚀模数只有 2 760 t/km^2 , 而有上方来水的 2 个草地样地都没有发现细沟。

总的来说, 调查结果表明: 在暴雨条件下, 长陡坡裸露坡耕地侵蚀模数远远高于作物坡耕地。当坡长 20 m 时, 裸露坡耕地细沟侵蚀模数约为种植作物的平作坡耕地的 1.5 倍, 而坡长 20 m 时等高垄作坡耕地细沟侵蚀模数还不足裸露坡耕地的 5%。作物坡耕地坡长指数一般高于裸露坡耕地, 即幂函数曲线更加陡峭, 表明坡长越长细沟侵蚀随坡长增加的幅度越大。

3.2 上坡来水条件下细沟侵蚀量随坡长的变化

调查发现, 黄土丘陵区大多数坡耕地位于梁峁坡中部, 而且多数情况下, 与上坡的荒草地之间有陡坎, 高度一般在 1~2 m 之间。现有的细沟侵蚀估算模型很难用于模拟这种情况。6 个地块的调查结果表明, 有无上坡来水情况下, 细沟侵蚀模数随坡长的变化特征差异很大。图 2 表明上坡来水在地块上部造成了较为严重的细沟侵蚀, 尤其是有陡坎的地块 Q1、Q4 和 Q6, 在测量地块最上部细沟侵蚀模数就超过 40 000 t/km^2 , 坡度最大的 Q6 样地 (35°), 上坡集水区为坡长 38 m 的草地, 最大侵蚀模数出现在坡长 2 m 处, 高达 56 304 t/km^2 。Q4 和 Q1 坡度相近, 样地平均侵蚀模数也相近。但 Q1 上坡集水区坡长为 20 m 的草地, 在样地上部细沟侵蚀明显高于上坡集水区为耕地的 Q4。另一方面, 与没有上坡来水的样地相比, 随着坡长的增加, 细沟侵蚀强度并没有呈现出急剧增大的趋势, 在坡长 5 m 前反而出现减小趋势, 然后呈现较为平缓的增大或波动趋势。可见, 地块上承接的降水与上坡来水相比, 对细沟侵蚀的影响相对较小。没有明显陡坎的地块 Q3、Q5 和 Q7 的细沟侵蚀模数相对较小, 样地平均侵蚀模数是有陡坎样地的 35.9%。而且细沟侵蚀模数随着坡长呈现平缓增大的趋势。这说明径流从陡坎获得的势能是造成严

重细沟侵蚀的重要因素。

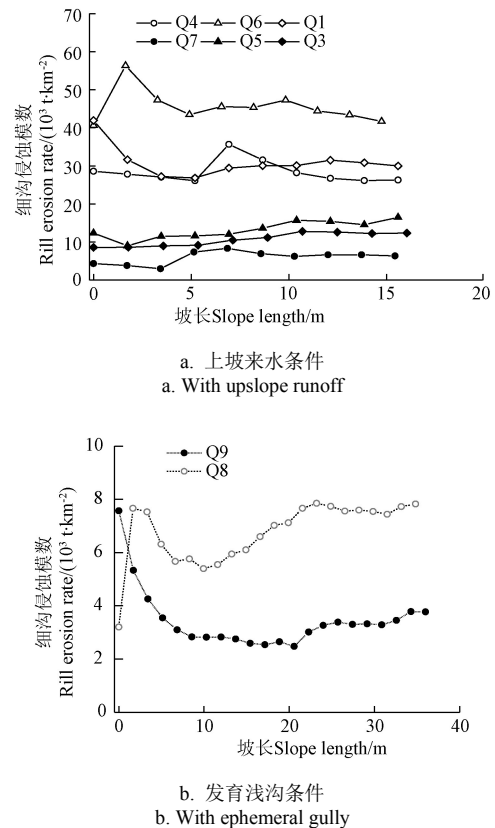


图2 上坡来水和浅沟条件下细沟侵蚀模数随坡长的变化
Fig.2 Changes of rill erosion rates with slope length under the effects of upslope runoff and ephemeral gully

3.3 坡面浅沟对细沟侵蚀的影响

在黄土高原丘陵沟壑区, 梁峁坡浅沟广泛发育。Q8 和 Q9 是相邻的 2 个地块, 每块的中间在“7.26”暴雨前就发育有一条浅沟, 而且修筑了一条简易截水沟, 把上坡来水疏导到浅沟中。对比图 1 和图 2, 可以看出有浅沟和截水沟的地块 (Q8 和 Q9) 细沟侵蚀量明显小于裸露坡耕地 (Q2) 和平作坡耕地 (S1 和 S2), 坡面平均侵蚀模数分别为 3 775 和 7 826 t/km^2 , 平均只有裸露坡耕地 (Q2) 的 25.8%, 是平作坡耕地 (S1 和 S2) 的 66.3%。由于有上坡来水和陡坎跌水的作用, 地块上部侵蚀模数较大, 但由于浅沟的汇流作用, 细沟侵蚀模数在 10 m 坡长以内逐渐减少。在坡度较小的 Q9 地块 (31°), 浅沟发育较浅, 从 10 到 30 m 的坡长, 细沟侵蚀模数随着坡长的增加略有增加。而在 Q8 地块 (34°), 浅沟发育较深, 细沟侵蚀模数明显大于 Q9, 在 10 到 23 m 坡段, 细沟侵蚀模数随坡长明显增加, 在 25 到 35 m 坡段, 侵蚀模数相对稳定。从图 3 可以看出: 测量断面的细沟数量和侵蚀模数随坡长增加呈现出较大的波动。2 个地块都是在 26 m (实际坡长) 的位置达到侵蚀模数的局部峰值后开始下降, 在 40 m 处达到另一个局部峰值, 通过实地观察, 主要原因是地块上部浅沟发育不明显, 而在中下部浅沟底部出现明显的下切。浅沟的发育导致径流向浅沟汇集, 从而减弱了细沟侵蚀。

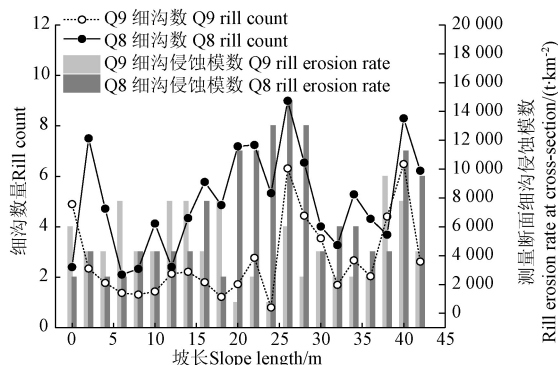


图 3 细沟条数和断面细沟侵蚀模数坡长的变化

Fig.3 Changes of rill counts and rill erosion rates at cross-section with slope length

4 讨论

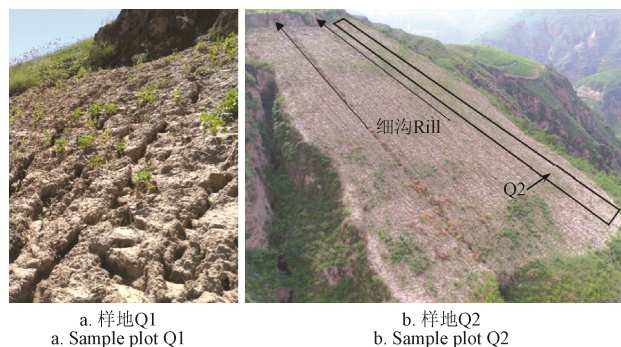
已有的坡耕地细沟研究成果主要集中于裸土细沟侵蚀特征及其发生机制的小区或水槽试验研究, 极端暴雨条件下细沟侵蚀观测很少^[12], 对于田间多种因素交互作用下的细沟侵蚀预报仍然缺少实用的方法。本研究基于黄土高原丘陵区暴雨条件下坡耕地细沟侵蚀的实测结果, 分析长陡坡耕地细沟侵蚀随坡长的变化特征以及细沟侵蚀对方来水和坡面浅沟的响应, 力求为坡耕地细沟侵蚀评估和预报提供更多依据。

研究结果表明长陡坡裸露坡耕地侵蚀模数远远高于作物坡耕地, 且坡长越长, 差异越大。而坡度相近的情况下, 撂荒坡耕地细沟侵蚀模数只有裸露坡耕地的 12%, 草地更是未发现细沟侵蚀。裸露坡耕地和作物坡耕地细沟侵蚀随坡长的变化存在明显差异。在作物生长的情况下, 坡长较短时, 对细沟侵蚀有一定抑制作用, 但随着坡长的增加, 细沟侵蚀模数增加的幅度逐渐增加。同时, 调查数据也证明了细沟的发育受到耕作方式的影响, 在暴雨条件下, 等高垄作能够减少局部细沟侵蚀, 但未能完全消耗的径流能量, 仍然会造成下坡细沟侵蚀。这与 Desmet 等^[31]的研究结果类似。

结合以往的观测数据^[4]进行分析, 同样是在裸地的条件下, 暴雨强度越大, 细沟侵蚀越严重, 坡长指数也越大, 即细沟侵蚀模数随坡长增加的幅度越大。幂函数可以很好地拟合裸地细沟侵蚀模数与坡长的关系, 即 $Er=aL^b$, 坡长指数 b 为 0.831。而 Liu 等^[25]在黄土高原得到的裸地坡长指数是 0.44, Liu 分析的土壤流失量包括细沟间侵蚀和细沟侵蚀, 而本文只分析了细沟侵蚀。Renard 等^[20]认为如果以细沟侵蚀为主, b 值接近 1, 如果以细沟间侵蚀为主, b 值则接近 0。本文得到的长陡坡坡长指数更接近于 Govers^[17]的结果 ($b=0.75\pm0.25$)。另一方面, “7.26”暴雨强度大于 Liu 等^[25]分析的暴雨强度, 而且细沟侵蚀模数大于该研究中的坡面侵蚀模数, 表明暴雨强度越大, 长陡坡细沟侵蚀强度越大, 随坡长增加的幅度越大, 进一步印证了 Liu 所发现的雨强与坡长指数的关系。

黄土高原丘陵沟壑区的坡耕地主要分布在梁峁坡面的中部, 大多有上方来水汇入, 坡面上也广泛发育浅沟。

细沟侵蚀对于上方来水和坡面浅沟的响应对于准确估算细沟侵蚀不容忽视。实地观察和数据分析都表明上坡来水在坡耕地地块上部造成了较为严重的细沟侵蚀 (图 2 和图 4)。但是, 随着坡长的增加, 细沟侵蚀强度并没有呈现明显的增加趋势, 说明上坡来水与地块上承接的降水相比, 对细沟侵蚀的影响更大, 进一步证实了人工降雨试验得到的结论, 即上方汇流是影响坡面下方侵蚀产沙的重要因素^[14]。王颢林等^[12]在同一小流域的调查结果也表明上方来水集中排水可有效的减少细沟侵蚀强度。而坡面浅沟的存在则大大减小了细沟侵蚀强度, 浅沟发育越明显, 细沟侵蚀强度就越小。



注: Q1 样地受上坡来水影响细沟侵蚀严重; 上坡来水造成 2 条较大的细沟, 但样地 Q2 未受上坡来水影响。

Note: Serious rill erosion on site Q1 with the effect of upslope runoff. Upslope runoffs cause two big rills on the slope, but no upslope runoff contributing to site Q2.

图 4 上坡来水对坡耕地细沟侵蚀的影响

Fig.4 Impact of upslope runoff on rill erosion on the sloping cropland

5 结论

1) “7.26”暴雨条件下, 长陡坡裸露坡耕地侵蚀模数 22 478 t/km², 远远高于作物坡耕地, 且坡长越长, 差异越大。当坡长 20 m 时, 裸露坡耕地细沟侵蚀模数约为种植作物的平作坡耕地的 1.5 倍。等高垄作能够有效减少细沟侵蚀。撂荒坡耕地细沟侵蚀模数为裸露坡耕地的 12%, 草地未发现细沟侵蚀, 说明暴雨条件下坡耕地是坡面细沟侵蚀的主要地类。

2) 幂函数可以很好地拟合细沟侵蚀模数与坡长的关系, “7.26”暴雨条件下, 裸露坡耕地坡长指数为 0.831。暴雨强度越大, 坡长指数也越大, 即细沟侵蚀模数随坡长增加的幅度越大。

3) 上坡来水在坡耕地上造成了严重的细沟侵蚀。但细沟侵蚀强度并未随着坡长增加呈现明显的增加趋势, 说明上坡来水与地块上承接的降水相比, 对细沟侵蚀的影响更大。坡面浅沟的存在则大大减小了细沟侵蚀强度, 浅沟发育越明显, 细沟侵蚀强度就越小。

致谢: 感谢北京师范大学刘宝元教授指导野外调查, 谢岩老师提供无人机航拍影像。感谢北京林业大学张婵娟和邓家勇同学参与野外调查和无人机测量。

[参 考 文 献]

- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2):

- 99-115.
Zhu Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1956, 4(2): 99-115. (in Chinese with English abstract)
- [2] Govers G, Poesen J. Assessment of the rill and interrill contributions to total soil loss from an upland field plot[J]. *Geomorphology*, 1988, 1(4): 343-354.
- [3] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 1989, 26(2): 109-116.
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land[J]. *Acta Pedologica Sinica*. 1989, 26(2): 109-116. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王玉宽. 暴雨细沟侵蚀的调查研究[J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1990 (2): 45-49.
Wang Yukuan. Study on the rill erosion under heavy rainstorm[J]. *Memoir of NISWC, Academia Sinica & Ministry of Water Conservancy*, 1990 (2): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 429-436.
- [6] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 87-91.
Zheng Liangyong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Slope erosion process tracing in simulated raining with rare earth elements[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(3): 87-91. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1319-1325.
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1319-1325. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 114-119.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Tang Hongwu. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(5): 114-119. (in Chinese with English abstract)
- [9] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 104-112, 89.
Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on loess hillslope[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 104-112, 89. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jiang Fangshi, Zhan Zhenzhi, Chen Jialin, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain[J]. *Catena*, 2018, 169: 46-58.
- [11] 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 1-5.
Chen Junjie, Sun Liying, Liu Junti, et al. Effect of slope gradient on rill erosion under different rainfall intensities and slope lengths[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [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): 122-131.
Wang Haolin, Jiao Juying, Tang Bingzhe, et al. Characteristics of rill erosion and its influencing factors in slope 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): 122-131. (in Chinese with English abstract)
- [13] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 23-27.
Xiao Peiqing, Zheng Fenli. Effect of run-on water and sediment on rill erosion process at down-slope section[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(1): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [14] 汪晓勇, 郑粉莉, 张新和. 上方汇流对黄土坡面侵蚀—搬运过程的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 7-11.
Wang Xiaoyong, Zheng Fenli, Zhang Xinhe. Effects of upslope runoff on detachment and transport processes on loessial hillslopes[J]. *Science of Soil and Water Conservation*. 2009, 7(2): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- [15] Gabriels D, Pauwels J, De Boodt M. A quantitative rill erosion study on a loamy sand in the hilly region of Flanders[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1977, 2: 257-259.
- [16] Van L M, Saxton K. Slope steepness and incorporated residue effects on rill erosion[J]. *Transactions of ASAE*, 1983, 26: 1738-1744
- [17] Govers G. Rill Erosion on Arable Land in Central Belgium: Rates, Controls and Predictability[J]. *Catena*, 1991, 18: 133-155.
- [18] 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.
- [19] 陈超, 雷廷武, 班云云, 等. 东北黑土坡耕地不同水力条件下坡长对土壤细沟侵蚀的影响(英文)[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 163-170.
Chen Chao, Lei Tingwu, Ban Yunyun, et al. Effects of slope lengths on rill erosion under different hydrodynamic conditions in black soil sloping farmland of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(5): 163-170. (in English with Chinese abstract)
- [20] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (Transactions of the ASAE)*, 1989, 32(5): 1571-1576.
- [21] Foster G R, Meyer L D, and Onstad C A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (Transactions of the ASAE)*, 1977, 20(4): 683-687.
- [22] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation[R]. *USDA Agricultural Handbook*, 1997, 703.
- [23] McCool D K, George G O, Freckleton M, et al. Topographic effect on erosion from cropland in the northwestern wheat region[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (Transactions of the ASAE)*, 1993, 36(4): 1067-1072.

- [24] 黎四龙, 蔡强国, 吴淑安, 等. 坡长对径流及侵蚀的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(1): 29-35.
Li Silong, Cai Qiangguo, Wu Shu'an, et al. Effect of slope length on runoff and soil erosion[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(1): 29-35. (in Chinese with English abstract)
- [25] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1759-1764.
- [26] Govers G, Giménez R, Oost K V. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations[J]. Earth Science Reviews, 2007, 84(3/4): 87-102.
- [27] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.
Jiang Zhongshan, Wang Zhiqiang, Liu Zhi. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the Loess hilly region[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41-45, 49.
Zheng Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation. 1989, 9(4): 41-45, 49. (in Chinese with English abstract)
- [29] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
Peng Wenying, Zhang Keli, Chen Yao, et al. Research on soil quality change after returning Farmland to forest on the loess sloping croplands[J]. Journal of Natural Resources. 2005, 20(2): 272-278. (in Chinese with English abstract)
- [30] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 647-754.
Lian Gang, Guo Xudong, Fu Bojie, et al. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica. 2006, 26(3): 647-754. (in Chinese with English abstract)
- [31] Desmet P J J, Govers G. Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography[J]. Catena, 1997, 29(3/4): 283-307.

Rill erosion of long and steep cropland on the Loess Plateau under heavy rainstorm

Wang Zhiqiang¹, Yang Meng², Zhang Yan^{2*}, Zhang Shuai¹

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, college of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Rill erosion can be defined by concentrated flow in small rivulets. This type of water erosion has posed a great challenge on the sloping cropland on the Loess Plateau in China. Most previous studies were focused on the field or laboratory experiment, while the research on rill erosion under conditions of extreme heavy rain is still lacking, particularly on practical prediction on specific cropland. The purpose of this study is to investigate the characteristics of rill erosion on long and steep slopes under extreme rainstorms based on field survey data. After the heavy rainstorm on the central Loess Plateau on July 26, 2017, 15 sampling sites were selected based on Google imagery near the rainstorm center with event rainfall of 212 mm and the maximum 60-min rainfall intensity of 49.2 mm/h for rill erosion measurement. In each sampling site, cross-sectional properties were measured at 2-m intervals, and the width and depth of each rill in each section were recorded. Topographic parameters were measured based DSM derived from drone aerial images in 0.20 m resolution. Rill erosion data from a previous study on five plots under storm conditions were used to compare the impact of rainfall intensity on rill erosion along slope length. The results showed that: 1) Under rainstorm conditions, the rate of rill erosion on bare sloping cropland was 22 487 t/km², and that on sloping cropland accounted for 68.6% that of the bare land, as the slope length was 20 m. Contouring cultivation can reduce effectively erosion, where the rill erosion was less than 5% that of the bare land, but the downslope rill erosion still occurred. The rate of rill erosion on fallow cropland was only 12% that on bare cropland with the same slope gradient, and no rill erosion was found on grassland. 2) The power function, $Er=aL^b$, can fit the relationships between the rill erosion rate and slope length. The index of slope length (b) was 0.831 for the bare land with the slope gradient of 34°. The index of slope length increased as the increase of the rainstorm intensity, indicating that the rate of rill erosion enhanced under heavy rainstorm conditions. 3) Most sloping croplands on the loess hilly region are located in the middle of hillslope, and there is a steep ridge with 1-2 m high between the cropland and uphill grassland. Upslope contributing runoff can cause severe rill erosion on the sloping cropland. Specifically, grassland with a length of 38m can lead to the maximum erosion modulus on the downslope cropland, 56 304 t/km². However, there was no clear increasing trend in the rate of rill erosion as the increase of slope length, indicating that the upslope runoff has a greater impact on rill erosion than the rainfall received on the site. The existence of ephemeral gullies on the slope reduced the rill erosion intensity due to the confluence capacity of the ephemeral gullies. The finding demonstrated that the more severely the ephemeral gullies was developed, the less the rill erosion intensity was. This study can provide an important reference to estimate the rill erosion on different types of sloping land in the hilly area of Loess Plateau.

Keywords: soils; erosion; rainstorm; rill; sloping cropland; slope gradient; slope length; upslope runoff