doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.031

黄土丘陵沟壑区浅沟发育动态监测与形态定量研究

徐锡蒙[1]　郑粉莉[2]　覃　超[2]　韩　勇[2]

(1.黄河水利科学研究院水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室,郑州 450003;
2.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,陕西杨凌 712100)

摘要:基于测尺法对野外浅沟发育过程进行长历时动态监测,并结合三维激光扫描和立体摄影测量技术,定量刻画了坡面浅沟集水区 3 条具有不同上方汇水面积的浅沟形态,揭示了浅沟发育动态变化过程,建立了浅沟沟槽跌坎间距与坡度的关系。结果表明:在 2003—2015 年观测期间,上方汇水面积分别增加 34.8% 和 159.6% 时,浅沟长度分别增加 39.6% 和 138.8%,沟槽平均宽度分别增加 19.7% 和 75.3%,沟槽平均深度分别增加 32.4% 和 71.4%,说明上方汇水面积对浅沟发育具有重要影响。浅沟形态监测表明,与 2003 年相比,2015 年 3 条浅沟长度分别增加 26.4%、12.1%、29.4%,增加速率分别为 0.82、0.55、0.52 m/a;浅沟沟槽断面面积分别增加 22.5%、65.1%、45.9%,增加速率分别为 5.0、15.8、4.1 cm^2/a。浅沟集水区春季的横向犁耕将沟槽两侧的表层土壤带入沟槽,使得沟槽两侧坡面高度每年平均下降 2 cm;浅沟沟槽宽度和深度随坡长呈先增大后减小的趋势,且在距坡底约 20 m 处达到最大值。70% 的浅沟沟槽跌坎间距均分布在 10 ~ 25 cm 之间。浅沟沟槽坡度主要分布在 15° ~ 40°之间,跌坎间距和坡度呈负指数关系。研究结果可为浅沟侵蚀防治提供科学依据。

关键词:浅沟形态;横断面;汇水面积;跌坎间距;三维激光扫描;摄影测量

中图分类号:S157.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)04-0274-09

Dynamic Monitoring of Ephemeral Gully Development and Its Morphology Quantification in Loess Hilly-gully Region

XU Ximeng[1]　ZHENG Fenli[2]　QIN Chao[2]　HAN Yong[2]

(1. *Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou* 450003, *China*
2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Dynamic quantification of field ephemeral gully development and morphology on natural hillslope has great significance on ephemeral gully erosion control and ephemeral gully erosion modelling. Due to the difficulty of dynamically monitoring field ephemeral gully catchments and limitation of measurement method, quantification of ephemeral gully morphology and its dynamic evolvement process is still lacking. Thus, based on the long-term field ephemeral gully development investigation data, three-dimensional laser scanning and photogrammetry techniques were used to quantify the ephemeral gully morphology of three ephemeral gully catchments with different upslope drainage areas (1 012 m^2, 995 m^2 and 424 m^2). The dynamic evolution processes of ephemeral gully were revealed, and the relationship between drop-sills distance of headcuts and slope gradient was also analyzed. The result showed that during the monitoring period from 2003 to 2015, when upslope drainage area was increased by 34.8% and 159.6%, ephemeral gully length was increased by 39.6% and 138.8%, average ephemeral gully width was increased by 19.7% and 75.3%, and average ephemeral gully depth was increased by 32.4% and 71.4%, respectively. Dynamic monitoring illustrated that ephemeral gully length was increased by 26.4%, 12.1%, 29.4% from 2003 to 2015 and the increasing rate was 0.82 m/a, 0.55 m/a, 0.52 m/a;

收稿日期:2018-10-15　修回日期:2018-12-03

基金项目:水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金资助项目(2017001)、国家自然科学基金项目(41761144060)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室重要方向创新项目(A314021403-C2)

作者简介:徐锡蒙(1993—),男,助理研究员,博士,主要从事土壤侵蚀机理研究,E-mail:xuxm@igsnrr.ac.cn

通信作者:郑粉莉(1960—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与气候变化影响评价研究,E-mail:flzh@ms.iswc.ac.cn

the cross-section areas of ephemeral gully in 2015 was increased by 22.5%, 65.1%, 45.9% compared with those in 2013, and the increasing rate was 5.0 cm^2/a, 15.8 cm^2/a, 4.1 cm^2/a. Tillage in spring brought the lateral topsoil into the ephemeral gully channel which induced 2 cm decrement of soil layer around the channel. With the increase of slope length, ephemeral gully width and depth were increased first and then decreased, with maximum value in the location of about 20 m to the slope bottom. Totally 70% of drop-sills distances of headcuts in ephemeral gully channel were distributed in 10 ~ 25 cm, while slope gradients were distributed in the range of 15° ~ 40°. A negative exponent relationship can be found between drop-sills distance and slope gradient. The research results enhanced the understanding on ephemeral gully erosion processes, which could provide scientific bases for ephemeral gully erosion control.

Key words: ephemeral gully morphology; cross section; upslope drainage area; drop-sill distance; three-dimensional laser scanning; photogrammetry

0　引言

浅沟侵蚀是我国黄土丘陵沟壑区坡耕地的主要侵蚀类型，浅沟侵蚀带是坡面主要侵蚀产沙带[1-2]，浅沟分布面积占沟间地面积的 35% 左右，浅沟侵蚀量占沟间地侵蚀量的 35% ~ 70%[3-5]。因此，量化浅沟发育过程将为坡面侵蚀防治提供重要的理论支持。数十年来，浅沟侵蚀研究大多集中于浅沟侵蚀的野外调查[6-8]、浅沟发生的地形临界[9-13]、基于模拟降雨试验和模拟径流试验分析浅沟侵蚀的影响因素[14-17]、浅沟水流的水力学和水动力学特征等[18-19]。由于缺乏野外浅沟侵蚀长期定位监测资料，再加上受研究技术手段的限制，浅沟形态及其动态发育过程研究相对薄弱。

在浅沟侵蚀及形态参数测量方法方面，传统方法主要有填土法[20]、测尺法[21-22]和测针板法[23-24]等。填土法测量精度高，但时间和工作成本较高；测尺法能够获取浅沟长、宽和深的数值特征，但不能获取浅沟集水区全貌的基本侵蚀地形特征，也不能很好展示浅沟断面形态；测针板法兼具精确性和方便、廉价，但仍然无法细致刻画整个浅沟集水区以及浅沟沟槽形态。随着测绘技术的发展，高精度差分 GPS[25]、三维激光扫描技术[26-28]和立体摄影测量技术[29]等为浅沟形态的精细化定量研究提供了契机。CHENG 等[25]在黄土高原利用 RTK GPS 对 49 条浅沟形态进行了定量研究，探究了浅沟的空间分布规律，定量研究了上方汇水面积和坡度等基本地形特征之间的关系，但未涉及浅沟横断面的发展以及浅沟沟槽形态研究；WU 等[27]利用三维激光扫描技术在野外条件下对较大尺度上发育活跃期的切沟进行了测量，为精确测量较大尺度的浅沟集水区的形态特征提供了方法支持；WELLS 等[29]分别在室内和室外建立了用摄影测量监测小尺度内浅沟沟槽形态特征的方法。

本文基于测尺法对野外浅沟发育过程进行长历时的动态监测，并结合三维激光扫描和立体摄影测量技术，定量刻画野外天然降雨条件下自然坡面浅沟形态特征，以期为坡面浅沟侵蚀防治提供重要科学依据，并为包含浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型建立提供理论支持。

1　试验设计与研究方法

1.1　野外观测站概况

野外观测站位于陕西省延安市桥北林业局富县任家台林场（109°09′E，36°05′N）所辖的北洛河三级支流—瓦窑沟小流域[30-31]。观测站所属的地貌类型属于黄土丘陵沟壑区，海拔为 920 ~ 1 683 m，相对高度差 100 ~ 150 m，沟谷密度 4.5 km/km^2。观测站年均气温为 9℃，年均降水量 576.7 mm，多集中在 7、8、9 月，占全年降水的 60% 以上，日最大降水量 130 mm。根据中国土壤分类，观测站的土壤类型为灰色黄土正常新成土[32]，其中沙粒占 6.7%，粉粒占 71.7%，粘粒占 21.2%。

1.2　野外试验布设

在野外观测站共布设了不同面积、不同上方汇水和不同坡度条件下的 3 条浅沟集水区的侵蚀观测场（表 1）。1989 年，为研究植被破坏等人类活动对加速侵蚀过程的影响，进行了野外浅沟侵蚀发育过程的动态监测，在试验观测站对林地进行开垦，并建立浅沟集水区径流和侵蚀观测场[33]。在 1989—2015 年整个观测期间，每年雨季（4 月）前根据当地传统整地方式对地表进行横向犁耕，犁耕深度为 20 cm，然后在每年整个观测期间（4—10 月）保持地表为裸露休闲，且通过人工除草保证地表植被覆盖小于 5%，剔除植被对土壤侵蚀的影响。3 条浅沟集水区径流观测场经过 10 多年侵蚀和犁耕活动后，土壤侵蚀严重，年均侵蚀模数达 8 000 ~ 12 000 t/km^2，导致土壤基本性质与当地农耕地类同[30,34]，并形成了耕层和明显犁底层共同存在的土层结构。3 条浅沟集水区的基本地形参数特征见表 1。

表 1 野外 3 条浅沟集水区的基本参数特征

Tab. 1 Topographic characteristics of three ephemeral gully catchments in field

浅沟集水区号	面积/m^2	浅沟上方汇水面积/m^2	坡度/(°)	平均长度/m	平均宽度/m	浅沟集水区在坡面位置
EGC1	1 012	362	11 ~ 32	84.4	12.0	覆盖全墚坡
EGC2	995	488	5 ~ 35	73.0	13.6	覆盖全墚坡
EGC3	424	188	26 ~ 35	36.0	11.8	位于坡面中下部

1.3 浅沟形态测量方法

1.3.1 基于测尺法的长期定位监测

由于林地开垦初期尚未形成明显的犁底层,所以未选取林地开垦后 1989—2002 年期间的野外观测资料,而是选取形成明显犁底层后 2003—2015 年期间的 13 年观测资料。每年雨季结束后(10 月底)用测尺法沿着浅沟沟长每隔 1 m 测量当年浅沟沟槽的宽度和深度,用于分析浅沟发育的年际动态变化。

1.3.2 基于三维激光扫描技术的浅沟发育动态变化监测

在浅沟集水区,从坡顶分水岭到沟缘线的土壤侵蚀具有明显的垂直分带性(片蚀为主的侵蚀带、细沟侵蚀为主的侵蚀带、浅沟侵蚀为主的侵蚀带),且不同侵蚀带的坡度有明显差异(表 1),在某一个固定的测站扫描无法获得浅沟集水区的全貌。因此,在利用三维激光扫描技术对浅沟集水区进行扫描时,需要进行多站扫描。图 1 展示了在 2 号浅沟集水区(EGC2)布设的 5 个测站位置。为了确保多个测站的点云数据顺利拼接,在浅沟集水区的四周设置了 4 个固定标靶,其中两个标靶设置在细沟侵蚀带和浅沟侵蚀带的交界线上,另外两个标靶设置在浅沟侵蚀带中部,以保证在扫描的每一站均能扫描到至少 3 个标靶并确保拼接顺利进行。在设置好固定标靶后,2013—2015 年用三维激光扫描仪对 3 个浅沟集水区进行连续定位监测,监测时间分别在春季犁耕后的 4 月下旬和雨季后的 10 月下旬,具体监测时间为 2013 年 11 月—2015 年 11 月。利用三维激光扫描技术测量浅沟集水区形态时,所选取的扫描密度为 1 cm,每次监测结束后,将三维激光扫描得到的点云数据,用仪器自带的 Cyclone 6.0 软件进行拼接、降噪等处理并生成不规则三角网(TIN MESH)(图 2),随后将点云数据以. txt 的形式导入 ArcGIS 10.4(ESRI Inc., Redlands, CA, 美国)软件,生成 1 cm 分辨率的 DEM 后对浅沟形态进行分析。



图 1 5 个测站位置示意图(EGC2)

Fig. 1 Sketch of five monitoring stations(EGC2)

1.3.3 基于立体摄影测量技术的浅沟沟槽形态监测

摄影测量在每次三维激光扫描测量后进行。首先分离出三维激光扫描存在的沟壁遮挡部位,然后根据其分布沿浅沟沟槽选取 3 ~ 5 段浅沟沟槽进行测量,每段沟槽长度为 1 ~ 2 m,以保证图像可以包含选取沟槽的全部信息。在利用立体摄影测量技术监测浅沟沟槽时,首先,在监测点周围布设 10 个黑白标靶,并保证任意 5 个标靶不在同一条直线上,在所有图像拍摄过程中保持标靶不移动,用于拼接不同角度的图像(图 3)。随后,将具有手动对焦功能的数码相机(Canon EOS 5D Mark Ⅱ)进行设置,分辨率为相机的最大分辨率,调整相机模式为 M 手动模式、光圈 f/2.8、ISO 感光度 250 和快门速度 1/20 s,随后自动对焦至拍摄物体清晰可见,然后将对焦模式改为手动对焦,并确保在每次监测过程中相机焦

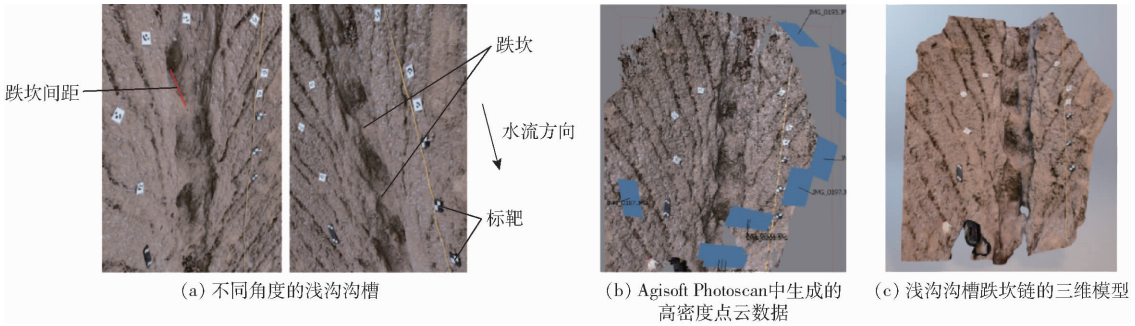


(a) EGC1照片 (b) EGC1 TIN MESH (c) EGC2照片 (d) EGC2 TIN MESH (e) EGC3照片 (f) EGC3 TIN MESH

图 2 各浅沟集水区照片与三维激光扫描监测

Fig. 2 Photos of each ephemeral gully catchment and LiDAR monitor

距不发生变化，且任意两幅图像的重叠率大于90%[35]，最后围绕拍摄物体即浅沟沟槽拍摄约10幅图像。野外测量结束后，将图像导入 Agisoft Photoscan Professional 1.2.4 软件（Agisoft LLC，St. Petersburg，俄罗斯）中，对图像进行校正和拼接，生成高密度点云数据，随后将点云数据导入 ArcGIS 10.4 中进行空间校正，生成 TIN 并得到 DEM[35-36]，其分辨率为 1 cm。最后建立浅沟沟槽跌坎链的三维模型（图 3），并测量浅沟沟槽内跌坎链的形态特征。



(a) 不同角度的浅沟沟槽　(b) Agisoft Photoscan中生成的高密度点云数据　(c) 浅沟沟槽跌坎链的三维模型

图 3　浅沟沟槽立体摄影测量监测

Fig. 3　Ephemeral gully channel monitoring by photogrammetry

2　结果与分析

2.1　基于测尺法长期定位监测的浅沟形态特征

由于 2003 年以后在浅沟集水区内形成了明显的耕层和犁底层土体构型，所以基于 2003—2015 年观测期间每年雨季结束后利用测尺法对浅沟沟槽长宽深的监测结果，统计分析了 2003—2015 年 13 年的浅沟沟槽长宽深的动态变化，定量描述浅沟发育特征（表 2）。

表 2　2003—2015 年浅沟沟槽长宽深的统计特征

Tab. 2　Statistical characteristics of ephemeral gully channel morphology during 2003—2015

统计参数	长度/m			宽度/cm			深度/cm		
	EGC3	EGC1	EGC2	EGC3	EGC1	EGC2	EGC3	EGC1	EGC2
最大值	29.5	51.2	65.7	28.8	41.9	55.9	13.1	19.5	24.4
最小值	22.8	40.5	58.6	18.0	27.1	31.5	8.5	10.8	12.5
平均值	26.3	45.0	62.8	23.9	35.0	41.9	11.2	14.5	19.2
标准偏差	2.4	3.3	2.4	3.3	4.1	7.6	1.5	2.7	4.0
变异系数/%	9.1	7.3	3.8	13.8	11.7	18.1	13.4	18.6	20.8

对比表 2 中浅沟沟槽长宽深的平均值可知，上方汇水面积对浅沟发育有重要影响。EGC3 和 EGC1 的上方汇水面积分别为 188 m^2 和 362 m^2，EGC2 的上方汇水面积为 488 m^2，后者分别是前二者的 2.60、1.34 倍；对应的 EGC3 和 EGC1 的浅沟长度分别为 22.8～29.5 m 和 40.5～51.2 m，而 EGC2 的浅沟长度为 58.6～65.7 m，其分别是 EGC3 和 EGC1 浅沟长度的 1.73～2.57 倍和 1.28～1.45 倍；EGC3 和 EGC1 的浅沟沟槽平均宽度分别为 18.0～28.8 cm 和 27.1～41.9 cm，而 EGC2 的浅沟沟槽平均宽度为 31.5～55.9 cm，其分别是前二者的 1.75～1.94 倍和 1.16～1.33 倍；EGC3 和 EGC1 浅沟平均深度分别为 8.5～13.1 cm 和 10.8～19.5 cm，而 EGC2 的浅沟平均深度为 12.5～24.4 cm，其分别是前二者的 1.47～1.86 倍和 1.15～1.25 倍。

研究还发现，与 EGC3 相比，当 EGC1 和 EGC2 的上方汇水面积分别增加 34.8% 和 159.6% 时，浅沟长度分别增加 39.6% 和 138.8%，沟槽平均宽度分别增加 19.7% 和 75.3%，沟槽平均深度分别增加 32.4% 和 71.4%，说明了上方汇水面积对浅沟发育的重要影响。

浅沟长度和沟槽横断面面积是浅沟形态特征的重要指标，也是表征浅沟侵蚀量的重要参数。基于 2003—2015 年浅沟长度和沟槽横断面面积动态变化的分析，进一步讨论浅沟发育的动态变化。表 3 表明，与 2003 年相比，2015 年 EGC1、EGC2、EGC3 的浅沟长度分别增加了 26.4%、12.1%、29.4%，增加速率分别为 0.82、0.55、0.52 m/a。浅沟沟槽横断面平均面积也呈逐年增加趋势，与 2003 年相比，2015 年 EGC1、EGC2、EGC3 的浅沟沟槽横断面平均面积分别增加了 22.5%、65.1%、45.9%，增加速率分别为 5.0、15.8、4.1 cm^2/a。表 3 还表明，浅沟沟槽横断面平均面积的动态变化也受上方汇水面积的影响。EGC2 的浅沟沟槽横断面平均面积为 288.9～618.7 cm^2，而 EGC1 和 EGC3 的浅沟沟槽横断面面积分别为159.6～435.6cm^2和102.3～256.4cm^2，

表 3 2003—2015 年浅沟沟槽形态特征变化

Tab. 3 Ephemeral gully channel morphology changes during 2003—2015

年份	EGC1		EGC2		EGC3	
	长度/m	横断面平均面积/cm^2	长度/m	横断面平均面积/m^2	长度/m	横断面平均面积/m^2
2003	40.5	289.6	58.6	315.6	22.8	115.4
2004	41.5	336.8	60.4	364.5	23.5	158.6
2005	43.5	235.6	59.4	305.6	23.5	136.2
2006	42.6	225.5	60.2	288.9	25.4	125.5
2007	44.7	243.6	62.4	389.5	27.6	152.6
2008	42.1	159.6	62.6	192.2	26.4	102.3
2009	45.7	296.5	64.5	425.6	27.3	154.6
2010	44.7	241.8	65.6	390.9	28.4	149.9
2011	46.6	232.9	64.8	221.3	25.8	128.8
2012	43.1	283.6	62.8	355.5	23.1	152.3
2013	49.0	435.6	65.3	618.7	29.4	256.4
2014	50.4	361.1	64.5	538.0	29.1	179.0
2015	51.2	354.7	65.7	521.2	29.5	168.4

前者分别较后二者增加 42.0% ~81.0% 和 141.3% ~182.4% 。

表 3 还展现了极端降雨事件对浅沟发育过程的影响。如 2013 年 3 条浅沟集水区的沟槽横断面面积均为最大,这是因为当年 7 月 21 日发生了特大暴雨,其降雨量达到 131.0 mm,最大 30 min 雨强(I_{30})达到 1.50 mm/min[37]。对比各年的浅沟长度和沟槽横断面面积,发现浅沟长度和沟槽横断面面积总体皆呈现缓慢增大的趋势,这说明虽然每年的横向犁耕可覆盖浅沟沟槽痕迹,但往复的沟槽侵蚀和横向犁耕循环依然促进了浅沟的发育。

2.2 基于三维激光扫描的 2013—2015 年浅沟形态特征动态变化

图 4 为 2013—2015 年 3 条浅沟集水区浅沟发育的动态变化过程。每年雨季后,浅沟沟槽加宽和加深,两侧坡面上发育了细沟网向浅沟沟槽汇流,而每年春季的横向犁耕则覆盖了浅沟沟槽,仅留下了浅洼地形(2014 年 4 月和 2015 年 4 月),并消除了浅沟沟槽两侧的细沟网;随后其在下一轮雨季过程中受集中水流冲刷,又在相同位置重新开始了浅沟发育过程(2014 年 8 月和 2015 年 9 月)。

CAPRA 等[8]在意大利西西里岛中部利用钢尺监测了 3 条典型浅沟形态 18 年的动态变化,展示了



图 4 3 条浅沟集水区的浅沟形态对比(2013—2015)

Fig. 4 Morphology comparison of three ephemeral gully catchments (2013—2015)

浅沟宽度和深度不断增加并缓慢向切沟演变的过程，但由于测量精度受限，每条横断面上只测量了 4 个数据点，无法反映浅沟的真实形态。本文为了探究浅沟沟槽断面在连续的侵蚀和犁耕循环中的形态变化，在 EGC1 坡长 40、60 m 处动态监测了 2013—2015 年的沟槽横断面随侵蚀和耕作循环的变化（图 5）。

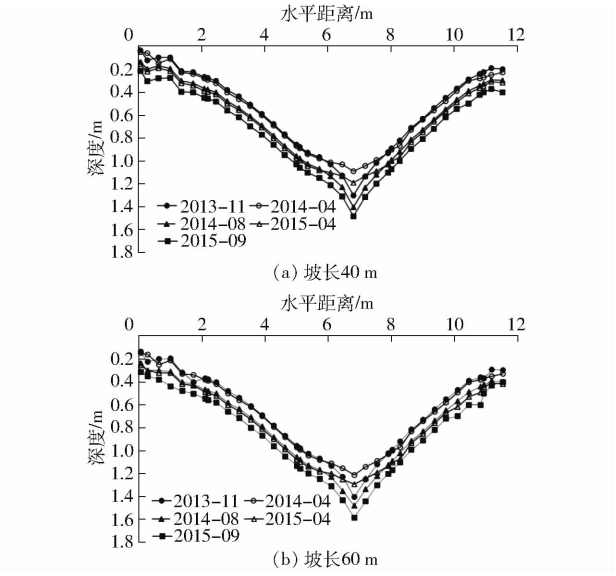


图 5　坡长 40、60 m 处横断面形态变化

Fig. 5　Cross section morphology changes at 40 m and 60 m slope length

图 5 表明，经过 2013 年雨季侵蚀过程后，当年 11 月坡长 40 m 处浅沟沟槽宽度和深度分别为 41、18 cm，坡长 60 m 处浅沟沟槽的宽度和深度分别为 45、20 cm；2014 年 4 月横向犁耕后，浅沟沟槽被填平，仅留下了浅洼地，且由于浅沟沟槽两侧土壤在横向犁耕过程中被带入沟槽部位，沟槽两侧坡面的高度平均下降了 2 cm。经过 2014 年的雨季侵蚀过程后，浅沟沟槽在相同位置再次出现，2014 年 8 月坡长 40 m 处沟槽宽度和深度分别为 32、16 cm，坡长 60 m 处浅沟沟槽的宽度和深度分别为 37、18 cm；在 2015 年 4 月横向犁耕后，浅沟沟槽再次被横向犁耕过程中沟槽两侧的土壤所填平，沟槽两侧坡面高度则相应的再次平均下降了 2 cm。2015 年雨季后，坡长 40 m 处浅沟沟槽宽度和深度分别为 27、12 cm，坡长 60 m 处浅沟沟槽宽度和深度分别为 37、15 cm。与坡长 40 m 处浅沟沟槽宽度和深度相比，坡长 60 m 处浅沟沟槽的宽度和深度相比均较大，这说明浅沟沟槽的宽度和深度随坡长的变化而变化。

表 2 仅统计了浅沟宽度和深度 13 年平均值的变化，而浅沟沟槽宽度和深度随坡长的变化尚不清楚。为此，本文基于 2013—2015 年三维激光扫描技术监测数据，统计分析了 2013—2015 年浅沟形态的动态变化过程。首先将三维激光扫描获取的点云数据导入 GIS 平台，获得了 2013 年和 2015 年雨季结束后 EGC1 和 EGC2 浅沟沟槽宽度和深度随坡长的变化数据（图 6）。由图 6a、6b 可知，浅沟沟槽宽度随坡长的增加呈先增大后减小的趋势，其最大值出现在距坡底 15 ~ 22 m 处，而最小值出现在坡面沟头位置处。对于 EGC1 和 EGC2 两条浅沟集水区，2015 年二者的浅沟长度均较 2013 年增加了 1 ~ 3 m。而对于同一条浅沟沟槽，2013 年和 2015 年的浅沟沟槽宽度差别较小。无论在 2013 年还是 2015 年，EGC2 浅沟沟槽的宽度均大于 EGC1 浅沟沟槽的宽度，说明上方汇水面积的增加使沟槽流量增大，径流侵蚀力增强，从而导致浅沟沟槽宽度的增加。

图 6c、6d 表明，浅沟沟槽深度随着坡长的增加

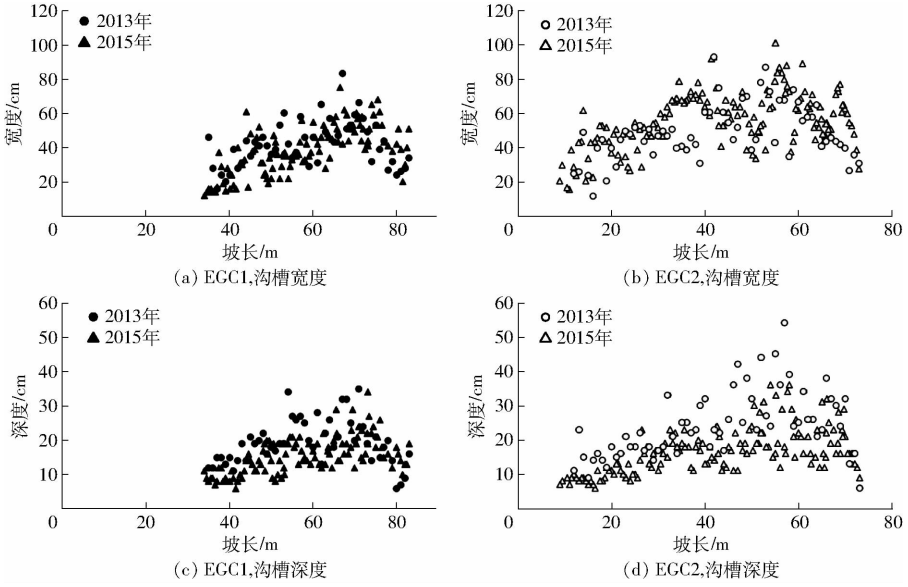


图 6　浅沟沟槽宽度和深度随坡长的变化

Fig. 6　Changes of ephemeral gully width and depth with slope length

也呈现先增大后减小的趋势,沟槽深度同样在距坡底约 20 m 处达到最大值,2013 年 EGC2 浅沟深度甚至达到了 54 cm,这可能与该年内的极端降雨事件有关。对于 EGC1 和 EGC2 两条浅沟集水区,2013 年的浅沟沟槽深度明显大于 2015 年的浅沟沟槽深度,这说明在野外自然条件下,降雨和地表汇流主要通过增加浅沟深度增加浅沟侵蚀量。因此,在进行浅沟测量及根据浅沟形态估算浅沟侵蚀量时,需要精确测量浅沟沟槽深度的变化,提高估算精度。另外,浅沟上方汇水面积的差异,也是导致浅沟沟槽深度增加的原因。如 EGC2 的上方汇水面积大于 EGC1 的上方汇水面积,所以 EGC2 浅沟沟槽深度均大于 EGC1 浅沟沟槽深度。

2.3 基于摄影测量技术的浅沟沟槽跌坎链形态特征分析

浅沟沟槽是集中水流侵蚀的结果,而集中水流的能量聚集和消散过程也会在浅沟沟槽内形成反馈。在每年降雨结束后,浅沟沟槽内都会形成一系列相互连接的跌坎,这一系列跌坎的组合形成了浅沟沟槽的跌坎链。基于建立的浅沟沟槽跌坎链的三维模型(图 3)测量了跌坎间距和跌坎处的坡度,统计了跌坎间距和坡度的频数分布(图 7)。

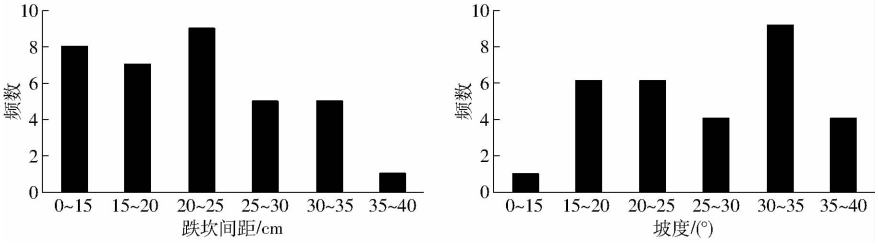


图 7 浅沟沟槽跌坎间距和坡度的频数分布

Fig. 7 Frequency distribution of drop-sills distance and slope gradient in ephemeral gully channel

浅沟沟槽跌坎间距主要分布在 10 ~ 35 cm 之间,且 70% 的跌坎间距均分布在 10 ~ 25 cm 之间。郑粉莉等[38]对野外自然降雨和人工模拟降雨条件下细沟发育坡面上的跌坎间距进行了统计发现,野外观测中超过 70% 的跌坎间距分布在 40 ~ 60 cm 之间,而室内人工模拟试验同样发现,超过 80% 的跌坎间距分布在 30 ~ 60 cm 之间。与细沟侵蚀为主坡面上的跌坎间距相比,浅沟沟槽跌坎间距相对较小,这主要与两者的水流能量差别有关。在以细沟侵蚀为主的坡面上,细沟水流流速和侵蚀能力较小;而在浅沟沟槽跌坎处,集中水流的流速和侵蚀能力较大[16-18],因而跌坎间距相应减小。结果还表明,跌坎处坡度主要分布在 15° ~ 40°之间,这与前人的研究结果类似[4]。

进一步统计了跌坎间距与坡度的关系,发现随着跌坎处坡度增大,跌坎间距呈减小趋势(图 8)。建立了跌坎间距与坡度的关系,二者呈负指数关系,R^2 为 0.903 2。这表明当浅沟沟槽处坡度较小时,水流势能转换为动能的速度较慢,因此水流需要较长的跌坎间距汇集足够的侵蚀能量。相反,当浅沟沟槽处坡度较大时,浅沟沟槽的水流能汇集足够的侵蚀能量形成下一个跌坎,导致跌坎间距相应地变短。

图 8 还表明,当坡度大于 30°时,跌坎间距大致变化于 13 ~ 18 cm 之间,这说明形成浅沟沟槽跌坎需要一定的水流能量,而水流能量的汇集需要一定的跌坎长度。在浅沟沟槽形成的阶梯状跌坎链反映了水流能量的转换和消耗过程[39]。

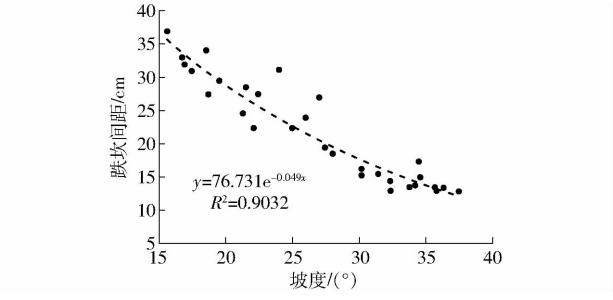


图 8 跌坎处跌坎间距与坡度的关系

Fig. 8 Relationship of distance between two drop-sills and slope gradient

2.4 测尺法、三维激光扫描和摄影测量技术在浅沟形态定量研究中的作用

浅沟集水区的特殊地形条件决定了其形态特征定量研究的特殊性,传统的测尺法可以测量其长宽深等基本形态特征指标,因此被应用在了前期的浅沟发育动态监测过程[34]。但测尺法的测量精度有限,不能获取精确的沿坡长变化的浅沟沟槽宽度以及浅沟断面形态特征等[8,22],需要寻求现代先进的测量手段监测浅沟集水区的侵蚀形态特征的动态变化。通过前人研究和长期的定位监测实践发现,三维激光扫描技术可以快速地获取整个浅沟集水区的侵蚀形态特征[26-28]。但对于某些特殊部位例如浅沟沟槽跌坎链,由于扫描距离较远和沟壁遮挡等因素,三维激光扫描技术很难在沟槽底部获取稠密的点云数据并刻画沟槽形态。而摄影测量技术可以很好地弥补这一缺点[29,35-36],其技术可通过不同角度的摄影图像快速获取浅沟沟槽的形态特征[40]。因

此，在浅沟形态的定量研究过程中，摄影测量可以弥补三维激光扫描测量的不足。

3　结论

（1）在 2003—2015 年监测期间内，当上方汇水面积分别增加 34.8% 和 159.6% 时，浅沟长度分别增加 39.6% 和 138.8%，沟槽平均宽度分别增加 19.7% 和 75.3%，沟槽平均深度分别增加 32.4% 和 71.4%。与 2003 年相比，2015 年不同汇水面积下的 3 条浅沟长度分别增加 26.4%、12.1%、29.4%，增加速率为 0.82、0.55、0.52 m/a；浅沟沟槽断面面积分别增加 22.5%、65.1%、45.9%，增加速率分别为 5.0、15.8、4.1 cm^2/a。

（2）三维激光扫描技术可以快速获取整个浅沟集水区的形态特征。结果表明，浅沟横断面随着侵蚀和耕作循环不断变化，雨季侵蚀后，浅沟沟槽在同一位置重复出现，沟槽宽度和深度在不同年间随降雨条件而改变；而横向犁耕则将沟槽两侧的表层土壤带入沟槽，沟槽两侧坡面高度每年平均下降 2 cm。浅沟沟槽宽度随坡长增加呈先增大后减小的趋势，其最大值出现在距坡底 15 ~ 22 m 处，而最小值出现在坡面沟头位置处。浅沟沟槽深度随着坡长的增大也呈先增大后减小的趋势，沟槽深度在距坡底约 20 m 处达到最大值。而由于上方汇水面积的差异，上方汇水面积较大的 EGC2 浅沟沟槽深度均大于 EGC1 浅沟沟槽深度。

（3）立体摄影测量可用于快速精细监测浅沟沟槽的跌坎特征，浅沟沟槽跌坎间距主要分布在 10 ~ 35 cm 之间，且 70% 的跌坎间距均分布在 10 ~ 25 cm 之间，与细沟沟槽相比，浅沟沟槽的跌坎间距明显减小，这与浅沟沟槽内较大的径流能量有关。浅沟沟槽坡度主要分布在 15° ~ 40°之间，跌坎间距和坡度呈负指数关系，R^2 为 0.903 2。当坡度大于 30°时，跌坎间距大致变化于 13 ~ 18 cm 之间，这说明形成浅沟沟槽跌坎，需要一定的水流能量，而水流能量的汇集需要一定的跌坎长度。

参　考　文　献

[1] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J]. 地理科学, 1984,4(4): 321 - 327.

[2] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956,7(2): 99 - 115.
ZHU Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1956,7(2): 99 - 115. (in Chinese)

[3] 唐克丽, 郑世清, 席道勤, 等. 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J]. 水土保持通报, 1983,13(5): 43 - 48.

[4] 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): 17 - 19.
ZHANG Keli. Study on the effect of shallow gully development on soil erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1991(4): 17 - 19. (in Chinese)

[5] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998,43(2): 200 - 203.

[6] CASALI J, LOPEZ J J, GIRALDEZ J V. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain)[J]. Catena, 1999, 36(1 - 2): 65 - 84.

[7] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50(2 - 4): 91 - 133.

[8] CAPRA A, LA SPADA C. Medium-term evolution of some ephemeral gullies in Sicily (Italy)[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 34 - 43.

[9] DAGGUPATI P, SHESHUKOV A Y, DOUGLAS-MANKIN K R. Evaluating ephemeral gullies with a process-based topographic index model[J]. Catena, 2014,113:177 - 186.

[10] DESMET P J J, POESEN J, GOVERS G, et al. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies[J]. Catena, 1999, 37(3 - 4): 377 - 392.

[11] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超. 沟蚀过程研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48 - 59.
ZHENG Fenli, XU Ximeng, QIN Chao. A review of gully erosion process research[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48 - 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160808&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.008. (in Chineses)

[12] MAUGNARD A, VAN DYCK S, BIELDERS C L. Assessing the regional and temporal variability of the topographic threshold for ephemeral gully initiation using quantile regression in Wallonia (Belgium)[J]. Geomorphology, 2014, 206: 165 - 177.

[13] VANDEKERCKHOVE L, POESEN J, OOSTWOUD W D, et al. Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean[J]. Catena, 1998, 33(3 - 4): 271 - 292.

[14] 徐锡蒙,郑粉莉,覃超,等. 沟蚀发育的黄土坡面上秸秆覆盖防蚀效果研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 130 - 137.
XU Ximeng, ZHENG Fenli, QIN Chao, et al. Erosion control effects of cornstalk mulching on loess hillslope with gully[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 130 - 137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150819&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.019. (in Chinese)

[15] 郑粉莉, 武敏, 张玉斌,等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. 地理科学, 2006,26(4): 438 - 442.
ZHENG Fenli, WU Min, ZHANG Yubin, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006,26(4): 438 - 442. (in Chinese)

[16] GONG J G, JIA Y W, ZHOU Z H, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. Geomorphology, 2011, 125(1): 203 - 213.

[17] XU Ximeng, ZHENG Fenli, WILSON G V, et al. Upslope inflow, hillslope gradient, and rainfall intensity impacts on ephemeral gully erosion [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 2623 - 2635.

[18] 龚家国, 周祖昊, 贾仰文,等. 黄土区浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学基本特性模拟实验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 92 - 96.
GONG Jiaguo, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. Simulation experiment of ephemeral gully erosion on basis hydraulics parameters of concentrated flow and erosion morphology in loess area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5):92 - 96. (in Chinese)
[19] 董月群, 雷廷武, 张晴雯,等. 集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 96 - 99.
DONG Yuequn, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 96 - 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130518&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.018. (in Chinese)
[20] DONG Yuequn, LI Fang, ZHANG Qingwen, et al. Determining ephemeral gully erosion process with the volume replacement method[J]. Catena, 2015, 131: 119 - 124.
[21] 张天宇. 垄作耕地浅沟深度的测量和换算[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5):138 - 144.
ZHANG Tianyu. Measurement and calibration of ephemeral gully depth in ridge-tillage croplands[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(5):138 - 144. (in Chinese)
[22] CASALI J, LOIZU J, CAMPO M A, et al. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion[J]. Catena, 2006, 67(2): 128 - 138.
[23] 徐锡蒙, 郑粉莉, 武敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 124 - 132.
XU Ximeng, ZHENG Fenli, WU Min. Quantification study of rainfall intensity and slope gradient impacts on ephemeral gully morphological characteristic on steep loessial hillslope[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 124 - 132. (in Chinese)
[24] CAPRA A, DI STEFANO C, FERRO V, et al. Similarity between morphological characteristics of rills and ephemeral gullies in Sicily, Italy[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(23): 3334 - 3341.
[25] CHENG Hong, ZOU Xueyong, WU Yongqiu, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2007,94(1):4 - 14.
[26] 吴红艳, 郑粉莉, 徐锡蒙,等. 不同分辨率 DEM 提取切沟形态特征参数的转化研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 147 - 152.
WU Hongyan, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Transformation of gully morphological characteristic indicators extracted from DEMs of different resolution[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6):147 - 152. (in Chinese)
[27] WU Hongyan, XU Ximeng, ZHENG Fenli, et al. Gully morphological characteristics in the loess hilly-gully region based on 3D laser scanning technique[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(8): 1701 - 1710.
[28] 张鹏,郑粉莉,王彬,等. 高精度 GPS,三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 11 - 15.
ZHANG Peng, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS, Leica HDS 3000 laser scanner and needle board method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(5): 11 - 15. (in Chinese)
[29] WELLS R R, MOMM H G, BENNETT S J, et al. A measurement method for rill and ephemeral gully erosion assessments [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(1): 203 - 214.
[30] 唐克丽, 郑粉莉, 张科利,等. 子午岭林区土壤侵蚀与生态环境关系的研究内容和方法[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集), 1993(1): 3 - 10.
[31] HAN Yong, ZHENG Fenli, XU Ximeng. Effects of rainfall regime and its character indices on soil loss at loessial hillslope with ephemeral gully[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(3): 527 - 538.
[32] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类组. 中国土壤系统分类(修订方案)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1995.
[33] 郑粉莉, 唐克丽, 王文龙, 等. 子午岭林区林地和开垦地土壤侵蚀特征研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集), 1993(1): 29 - 36.
[34] 郑粉莉, 张科利, 唐克丽, 等. 植被破坏与恢复对坡面浅沟侵蚀影响的研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集), 1993(1): 54 - 59.
[35] 覃超,郑粉莉,徐锡蒙,等. 基于立体摄影技术的细沟与细沟水流参数测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 150 - 156.
QIN Chao, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Measurement and characteristics of rill geometry and flow parameter based on photogrammetry[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 150 - 156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161120&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.020. (in Chinese)
[36] QIN C, ZHENG F, WELLS R R, et al. A laboratory study of channel sidewall expansion in upland concentrated flows[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 22 - 31.
[37] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙,等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系——以富县"7·21"特大暴雨为例[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4635 - 4643.
HAN Yong, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: a case study of the "7·21" disaster in Fuxian County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4635 - 4643. (in Chinese)
[38] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.
[39] 和继军, 吕烨, 宫辉力,等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 398 - 405.
HE Jijun, LÜ Ye, GONG Huili, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 398 - 405. (in Chinese)
[40] FRANKL A, STAL C, ABRAHA A, et al. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling[J]. Catena, 2015, 127: 92 - 101.