

雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究

徐锡蒙¹, 郑粉莉^{1,2*}, 武敏³

(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. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 浅沟形态特征是建立陡坡地坡面浅沟侵蚀预报模型的基础。为了定量研究黄土陡坡地浅沟形态特征, 在长 8 m、宽 2 m、深 0.6 cm 的试验土槽上制作了锥形浅沟, 设计了 2 个降雨强度 (50、100 mm/h) 和 3 个浅沟发生的典型坡度 (15°、20°、25°), 利用模拟降雨和径流冲刷 (10 L/min) 相结合的试验方法定量分析了黄土陡坡地的浅沟形态特征。结果表明: 降雨强度和坡度的增加均加快了坡面浅沟侵蚀过程并使浅沟沟槽宽度和深度不断增加, 25°和 100 mm/h 降雨强度下的浅沟沟槽平均宽度和深度比 15°和 50 mm/h 降雨强度下的分别增加 1.40 和 0.61 倍。根据测针板法得到的 3 cm×10 cm 精度的地表高程值数据, 在 Surfer 软件中生成不同试验处理下的地面数字高程模型 (DEM, digital elevation model) 及水流流路图等, 发现坡度的增加使两侧坡面细沟汇入浅沟沟槽的坡长增大, 而降雨强度的增加则导致浅沟沟槽两侧坡面细沟汇入浅沟沟槽的坡长缩短, 同时, 沟道密度、地面割裂度和浅沟复杂度均随着降雨强度和坡度的增加而呈现增大的趋势, 三者分别变化于 0.74~1.48 m/m²、0.13~0.29 和 1.64~2.84 之间, 而不同降雨强度和坡度条件下浅沟沟槽宽深比变化于 0.65~1.27 之间。基于不同试验处理下的 DEM, 根据相邻格网关系在水平方向上计算方向导数后发现, 方向导数格网等值线图可以有效地反映坡面浅沟和细沟的长度、表面积及侵蚀最严重的浅沟沟底位置。

关键词: 土壤; 侵蚀; 径流; 浅沟; 形态特征; 黄土陡坡地; 模拟试验; 方向导数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.016

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-11-0124-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.016 http://www.tcsae.org

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 124-132. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.016 http://www.tcsae.org

0 引言

浅沟侵蚀是在集中水流冲刷和人类耕作的共同作用下由坡面主细沟发育而来的典型线状集中水流侵蚀, 是坡面侵蚀过程中重要的侵蚀方式之一^[1-3]。浅沟能够被正常的耕作措施消除, 但会在下一次径流冲刷时发生在坡面的相同部位^[4-5], 随着耕作和侵蚀的交替进行, 浅沟可以发展成为固定的切沟^[6-7]。浅沟侵蚀是细沟侵蚀向切沟侵蚀演变过程中的过渡侵蚀类型, 在坡面形态演变和坡沟侵蚀系统中起着承上启下的作用^[8-10]。浅沟在黄土高原丘陵沟壑区第一副区和第二副区的分布面积占沟间地总面积的 78%, 其平均分布密度为每 15~20 m 宽坡面分布一条浅沟^[11]。野外调查结果表明, 浅沟侵蚀量占梁坡侵

蚀产沙量的 35%~46% 以上。因此, 浅沟侵蚀在黄土陡坡土壤侵蚀中占有重要地位, 需要对坡面浅沟侵蚀进行深入研究并建立能够预测浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型。

浅沟的形成和发展是坡面集中股流侵蚀的结果, 受地形临界条件的制约^[12-14]。因此, 浅沟常分布于坡度较陡的坡面上, 而且一般多发生于具有一定汇水面积的坡面中部和中下部^[14-15]。在浅沟发育过程中, 影响浅沟侵蚀的因素主要有侵蚀动力因子 (降雨^[4]、上方汇流^[16]、地下潜流^[8])、地形因子 (坡度、坡长、坡形等)^[11-12]、地表植被、土壤、土地利用类型和人类活动^[17]等。这些研究结果对认识浅沟侵蚀的发生和发展过程有重要作用。而在黄土丘陵区独特的地形地貌特征条件下, 浅沟的发生和发展使得原来平整的坡面成为独特的瓦背状地形, 并形成了一系列新的倾斜面, 增大了地面起伏度并增大了雨滴和径流与坡面的接触面积从而加强了侵蚀作用, 同时瓦背状地形使坡面径流泥沙横溢进入浅沟沟槽, 最终增大了坡面输沙量^[18]。因此, 研究浅沟形态特征对认识黄土陡坡地侵蚀产沙规律和建立相应的浅沟侵蚀预报模型具有重要意义。

在美国农业部等部门联合研发的浅沟侵蚀预报模型 (ephemeral gully erosion model, EGEM 模型)^[19]中, 浅沟形态特征例如浅沟长度、深度、分叉及横断面形态在

收稿日期: 2016-11-18 修订日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41271299); 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项目 (2017001); 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, 男, 河南卫辉人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: xuxm@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 郑粉莉, 女, 陕西蓝田人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报和侵蚀环境效应评价研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: flzh@ms.iswc.ac.cn

模型输入和模型运算过程中被限定, 使得其地区适应性较差^[20-21], 而通过借鉴 AnnAGNPS 和 RSULE2 等模型的基本原理预报浅沟侵蚀也需要以分析浅沟形态为基础, 提取水流流路并估算浅沟侵蚀量^[22-23]。因此, 研究浅沟形态特征可为建立适合陡坡地形的坡面浅沟侵蚀预报模型提供重要的理论支持。然而, 目前关于浅沟形态特征的定量研究在野外测量方面多集中于对浅沟长度及相邻浅沟间隔的描述^[14-15], 在室内模拟方面主要集中于对浅沟沟槽的宽度和深度的定点测量^[16-17], 且测量的范围和精度不足以将研究成果应用于侵蚀预报模型中。为此, 本研究利用模拟降雨和径流冲刷结合的试验方法, 用测针板法结合 Surfer 软件生成了雨季径流冲刷作用后的浅沟形态的地面数字高程模型 (digital elevation model, DEM), 量化了黄土陡坡地的浅沟形态特征, 以为黄土陡坡地浅沟侵蚀预报模型的建立提供科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。试验选用侧喷式降雨系统, 降雨高度 16 m, 能保证雨滴达到终点速度, 降雨均匀度大于 80%, 雨滴直径分布与天然降雨相似^[24]。供试土槽为 8 m 长、2 m 宽的固定式液压升降钢槽, 其深度为 0.6 m, 坡度调节范围 0~30°, 钢槽底部每 1 m 长排列 4 个孔径为 2 cm 的排水孔以保证试验过程中排水良好。钢槽上端设置了放水水箱, 能够模拟自然条件下的上方汇水情况, 钢槽下端设置了集流装置, 用来收集径流泥沙样品。

安塞县 (109°19'23"E、36°51'30"N) 位于黄土高原丘陵沟壑区腹地, 陡峭的地形条件、易于侵蚀的土质以及不合理的人为开垦等造成了浅沟地貌在此区域内的广泛分布。因此本研究选取的供试土壤即为此地区的黄绵土, 其颗粒组成为: 砂粒 (>50 μm) 质量分数占 28.3%, 粉砂粒 (2~50 μm) 质量分数占 58.1%, 黏粒 (<2 μm) 质量分数占 13.6%, 属粉壤土, 试验土壤的采集样地为当地典型的农耕地, 有明显的犁底层, 所以试验土壤样品采集时分为耕作层和犁底层 2 层, 分别进行采集和保存, 在装填土槽时填入相应的土层。用重铬酸钾-外加热法测定有机质质量分数为 5.9 g/kg; 水浸提法测定土壤 pH 值为 7.9 (土水比为 1:2.5)。

1.2 试验设计

黄土坡面的浅沟侵蚀过程主要包括当年雨季前人为横向犁耕及当年雨季径流冲刷侵蚀过程。本研究通过在室内人工建造浅沟发育初期的雏形, 利用模拟降雨结合径流冲刷研究了春季犁耕后当年雨季径流冲刷作用后的浅沟形态特征。根据野外坡耕地调查和实际测量的春季人为横向犁耕后的浅沟形态特征参数, 设计了本文中的浅沟雏形, 以保证浅沟形态在研究区的典型性和代表性。在土槽距顶部 2~8 m 处用刮板制作了浅沟雏形, 浅沟沟槽位于土槽中间, 浅沟沟底与两侧沟坡高差 12 cm, 浅沟雏形的横断面为弧形 (图 1)。制作浅沟雏形的刮板为 2 m

长的木板 (与试验土槽宽度相同), 木板两端与最低点的高程差为 12 cm, 并与浅沟雏形的弧形横断面形态一致。在每次试验处理前用相同的刮板制作浅沟雏形, 以保证雏形浅沟形态的一致。



图 1 浅沟雏形形态

Fig.1 Initial ephemeral gully morphology

根据黄土高原短历时、高强度侵蚀性降雨标准^[25] (即 $I_5=1.52$ mm/min, 5 min 瞬时雨量为 7.6 mm), 设计降雨强度为 50 和 100 mm/h。基于黄土高原浅沟分布较广且发育活跃的典型坡度 (浅沟侵蚀一般发育在 18°~35°的坡面上, 平均坡度为 23°)^[11,18], 并结合 15°是浅沟发生的临界坡度的研究结果^[26], 本研究设计了 15°、20°和 25°共 3 个陡坡地坡度^[3,27], 每次试验历时 70 min。为了模拟野外实际情况下浅沟沟槽发育过程中的侵蚀动力情况^[17], 根据野外实际情况下上方汇水面积及产流系数, 设计上方汇水流量为 10 L/min。各试验处理重复 2 次, 所有试验数据取平均值并计算标准偏差 (SD)。

1.3 试验步骤

为保持土壤原有结构免遭破坏, 不对试验土壤采取过筛和研磨处理。填土时, 首先用纱布填充试验土槽底部的排水孔, 在土槽底部填 10 cm 细沙, 以保证良好的透水性。然后在沙层上覆盖纱布, 并装填 40 cm 的黄绵土。填土时将 40 cm 的土层分为耕层和犁底层, 其中耕层深度为 20 cm, 容重为 1.06~1.10 g/cm³, 犁底层深度为 20 cm, 容重为 1.25 g/cm³。填土时采用分层装土, 每次装土深度为 5 cm, 以保证试验土槽装土的均匀性。每填完一层后, 用齿耙将土层表面耙松, 再填装下一层土壤, 以保证 2 个土层能够很好地接触。为了减小边界效应的影响, 在填土时将试验土槽的四周边壁压实。在填装耕层土壤后, 用传统的犁耕方式对土槽进行横向犁耕, 并用刮板将距土槽顶部 2~8 m 的表层土壤刮去, 制作浅沟雏形。

为了保证试验前坡面土壤含水量的一致性, 选用 30 mm/h 降雨强度进行预降雨至坡面产流, 然后静置 12 h 后开始正式降雨。正式降雨开始前, 对降雨强度和汇水流量进行率定, 当实测降雨强度和汇水流量与目标降雨强度和汇水流量的差值小于 5%方可进行正式降雨和冲刷试验。

由于测针板法精度可靠, 操作简单便且实用性强, 在沟蚀监测中得到了广泛的应用^[3,28]。因此, 在每场降雨结束后, 采用测针板法测量坡面浅沟及细沟形态。本研究采用的测针板宽度 1.6 m, 由 53 根测针构成, 测针间距为 3 cm。试验土槽宽 2 m, 当完成某一横断面 1 m 宽的测量后, 将测针板移动测量同一断面另 1 m 宽的坡

面形态。测量完一个断面的高程值后,将测针板沿坡长方向移动 10 cm 测量下一个断面的高程值。这样,长 8 m、宽 2 m 的试验土槽共被分成 80 个横断面,在每个横断面上每隔 3 cm 读取一个数值,共读取 67 个,一次试验中共测量 8 m×2 m 试验土槽的 5 360 个三维坐标数据,并将数据导入 Surfer 软件,生成 DEM。

1.4 浅沟形态指标

沟道密度 (ρ) 是指单位研究区域内所有沟道的总长度,能够反映坡面的破碎程度,计算式为

$$\rho = \sum_{i=1}^m L_i / A \quad (1)$$

式中 L_i 为第 i 条沟道及其分叉的总长度, m ; A 为研究坡面的表面积, m^2 。

地面割裂度 (D) 是指单位研究区域内所有沟道的平面面积之和,为无量纲单位,能够更为全面地反映坡面的破碎程度及浅沟侵蚀强度,计算式为

$$D = \sum_{i=1}^m A_i / A \quad (2)$$

式中 A_i 为第 i 条沟道的表面积, m^2 。

浅沟复杂度 (c) 是指浅沟沟槽及其分叉的总长度与对应的垂直有效长度的比值,能够反映向浅沟沟槽汇水的细沟水流流路的丰富度,计算式为

$$c = L_e / L_{ev} \quad (3)$$

式中 L_e 为浅沟沟槽及其分叉的总长度, m ; L_{ev} 为浅沟沟槽的垂直有效长度, m 。

浅沟沟槽宽深比 (R_{WD}) 是指浅沟沟槽宽度与对应深度的比值,该参数是无量纲参数,可以反映浅沟沟槽形状的变化,计算式为

$$R_{WD} = \sum_{j=1}^n W_j / \sum_{j=1}^n D_j \quad (4)$$

式中 W_j 为第 j 个监测点处的浅沟沟槽宽度, m ; D_j 为第 j 个监测点处的浅沟沟槽深度, m 。

1.5 方向导数计算

将高程点数据导入 Surfer 软件,生成 DEM,并根据相邻格网的关系进行方向导数计算,获得 DEM 格网在水平 X 轴正方向上的坡度及坡度变化率^[29]。本文选取的 3 种方向导数为:

一阶导数:计算 DEM 格网表面沿水平方向的坡度,等于坡度矢量和指定方向上的单位矢量的乘积。在某一特定格网上,沿水平轴方向,格网处坡度上升即为正值,坡度下降为负值,可用于判定坡面沟道发生的位置并量化地形起伏的剧烈程度。

$$\begin{aligned} \frac{df}{ds} &= \bar{g} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dx} & \frac{df}{dy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} \\ &= \frac{df}{dx} \cdot \cos(\alpha) + \frac{df}{dy} \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 \bar{g} 为格网点上的坡度矢量; α 是指定方向的角度值,本文中选取 X 轴正方向,则 $\alpha=0$; x, y 分别为水平和垂直方向上的距离。

二阶导数:计算 DEM 格网表面沿水平方向的坡度的变化率,为一阶导数的方向导数。经过“二阶导数”分析生成的格网文件可以显示在水平方向上坡度变化率的等值线。在某一个特定的格网上,水平方向上的二阶导数值越大,说明格网处于地表形态转折处,例如浅沟沟槽底部和沟壁等位置。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f}{ds^2} &= \frac{d \left[\frac{df}{ds} \right]}{ds} = \frac{d \left[\frac{df}{dx} \cdot \cos(\alpha) + \frac{df}{dy} \cdot \sin(\alpha) \right]}{ds} \\ &= \frac{d^2 f}{dx^2} \cdot \cos^2(\alpha) + 2 \frac{d^2 f}{dx dy} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \\ &\quad + \frac{d^2 f}{dy^2} \cdot \sin^2(\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

方向曲率 K_s :计算沿水平方向的剖面的切线倾角的变化率。方向曲率是对于一个表面 $f(x, y)$ 在某一方向上的切面倾角变化率的绝对值,均为正值。它与二次导数有些类似,其极值能展示水平方向上地表形态的转折位置。

$$K_s = \frac{\left| \frac{d^2 f}{ds^2} \right|}{\left[1 + \left(\frac{df}{ds} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

为了比较不同试验处理的地表形态特征及侵蚀空间分布,对降雨后坡面 DEM 格网进行方向导数计算得到一阶导数、二阶导数和方向曲率格网文件,并创建了各方向导数文件在水平方向上的剖面线并统计方向导数值,对比分析不同试验处理下坡面侵蚀强度的空间分布。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度和坡度条件下浅沟形态对比

根据测针板法得到的雨后地表形态的三维坐标数据,在 Surfer 软件中分别制作了各试验处理的坡面等高线图、水流流路图、格网矢量地图和 3D 曲面图(图 2)。

在降雨强度为 50 mm/h 的条件下,坡度为 15°时(图 2a),坡面土壤侵蚀主要发生在浅沟沟槽,经过 70 min,沟头溯源侵蚀活跃,浅沟沟头虽未达到坡顶位置,但其上方也出现了断续的细沟下切沟头,浅沟两侧的坡面仅有很浅的非固定水流流路出现,发生了轻微的细沟侵蚀。而坡度为 20°时(图 2b),浅沟沟头已溯源侵蚀至坡顶位置,浅沟沟槽宽度和深度略有增加,浅沟沟槽两侧的细沟侵蚀发育明显,细沟深度和宽度均增大,已形成了固定的水流流路。当坡度增加到 25°时(图 2c),浅沟沟槽与两侧细沟进一步加宽和加深,浅沟沟槽深度已接近犁底层位置(深度为(18.8±0.6) cm),其中部分浅沟沟槽深度已经超过犁底层(深度>20 cm)。对比 3 个坡度下的浅沟形态可知,在相同降雨强度和降雨历时条件下,随着坡度的增大,浅沟沟槽的沟头溯源侵蚀、沟壁崩塌和沟底下切侵蚀速率增加,同时浅沟沟槽两侧坡面上的细沟发育也更加完善,土壤侵蚀加剧。

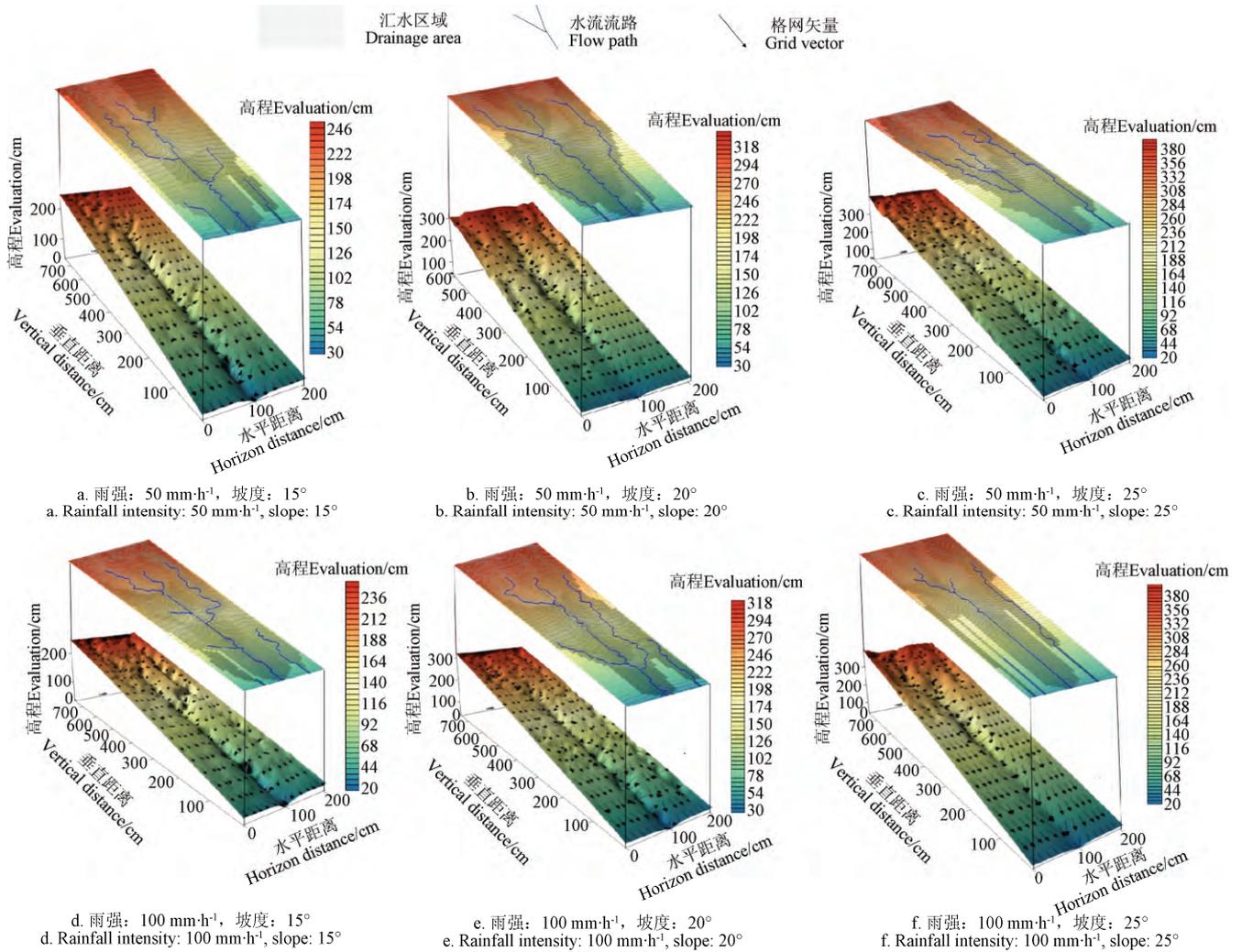


图 2 各试验处理下坡面水流流路和浅沟形态
Fig.2 Flow path and ephemeral gully morphology in different treatments

在降雨强度为 100 mm/h，坡度为 15°时（图 2d），坡面侵蚀主要为浅沟沟槽侵蚀和两侧坡面上固定流路的细沟侵蚀，与相同坡度 50 mm/h 降雨强度条件下的坡面侵蚀状况相比（图 2a），浅沟沟槽宽度略有增加，浅沟沟槽深度由于受到犁底层的限制变化不大，而两侧坡面上的细沟侵蚀明显加剧，细沟宽度和细沟深度均明显增大，汇入浅沟沟槽的细沟数量也增多。坡度为 20°时（图 2e），浅沟沟槽深度已超过耕层深度到达犁底层（平均深度为 (24.2 ± 2.8) cm），两侧坡面细沟网发育也更为完善。坡度为 25°时（图 2f），浅沟沟槽深度较 20°条件下略有增加，但沟壁崩塌侵蚀明显加快，浅沟沟槽宽度增加明显（平均宽度为 (35.0 ± 2.4) cm），几乎为 20°条件下浅沟沟槽宽（平均宽度为 (16.9 ± 0.8) cm）的 2 倍，而由于分叉细沟的合并，两侧细沟数量减少但细沟宽度和深度明显增加，同时，坡度的增加使得两侧的细沟水流无法在 8 m 的坡长内汇入浅沟沟槽而直接汇入出水口。

不同处理下浅沟沟槽的形态差别是由浅沟发育过程决定的。浅沟沟槽侵蚀过程包括沟头溯源侵蚀、沟底下

切侵蚀和沟壁扩张侵蚀 3 种过程（图 3），随着降雨强度和坡度的变化，浅沟沟槽的沟头溯源侵蚀、沟底下切侵蚀和沟壁崩塌侵蚀速率发生了变化^[17]，在 70 min 的降雨后停止在了不同的发育阶段，并决定了浅沟沟槽的最终形态。在降雨强度为 50 mm/h 的试验条件下，坡度为 15°的坡面在 70 min 降雨历时内主要以浅沟沟头溯源侵蚀为主；坡度为 20°的坡面已由沟头溯源侵蚀为主的阶段转入到了以沟底下切侵蚀为主的阶段；而坡度为 25°的坡面处于以沟底下切侵蚀为主的阶段，同时存在少量的沟壁崩塌。在 100 mm/h 降雨强度下，浅沟侵蚀过程明显加快。坡度为 15°的坡面在 70 min 降雨结束后就进入了沟底下切侵蚀和沟壁崩塌侵蚀并存的阶段，坡度为 20°的坡面则处于浅沟沟槽沟底下切侵蚀的后期，浅沟沟槽深度明显加大，而坡度为 25°的坡面则在 70 min 的降雨后结束了沟底下切侵蚀阶段，进入了以沟壁崩塌扩张侵蚀为主阶段，浅沟沟槽宽度明显增大。图 3 展示了 100 mm/h 和 25°条件下的浅沟侵蚀过程，并随着降雨历时的延长呈现出分别以沟头溯源侵蚀、沟底下切侵蚀和沟壁扩张侵蚀为主的 3 个浅沟发育阶段。

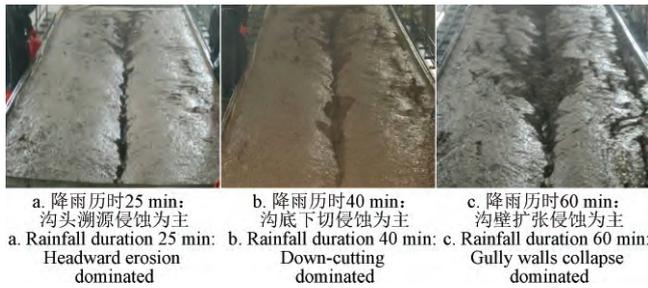


图3 降雨强度 100 mm/h 和坡度 25° 条件下的浅沟侵蚀过程
Fig.3 Ephemeral gully erosion processes under condition of 100 mm/h and 25°

对比各试验处理的水流流路图可知(图2),在浅沟沟槽发育的同时,浅沟沟槽两侧坡面上的细沟侵蚀也明显受坡度和雨强的影响。在相同的降雨强度下,随着坡度的增加,原来的断续细沟逐渐形成连续细沟并连接成细沟网络,细沟宽度和深度不断增加^[30]。此外,细沟汇入浅沟沟槽所需坡长逐渐增大,汇入浅沟沟槽时与浅沟沟槽所夹得锐角角度逐渐变小。例如,在 100 mm/h 的降雨强度下,15°坡面左侧的细沟每隔 2~3 m 坡长汇入浅沟沟槽,20°坡面左侧的细沟每隔 4~5 m 坡长汇入浅沟沟槽,而 25°坡面在 8 m 的坡长内左侧只有 1 条细沟汇入浅沟沟槽;类似的情况也发生在右侧坡面,15°坡面右侧的细沟在坡中部汇入浅沟沟槽,同时在坡面中部也形成了

一条没有汇入浅沟沟槽的细沟,20°坡面右侧的细沟在坡面下部汇入浅沟沟槽并在坡面下部形成了一条没有汇入浅沟沟槽的细沟,而 25°坡面右侧的细沟直接汇入了出水口,没有汇入浅沟沟槽。而对比相同坡度不同降雨强度下的细沟形态可知,降雨强度的增大促进了两侧细沟网的发育,使细沟变宽变深,而且缩短了细沟向浅沟沟槽汇水所需的坡长,即降雨强度的增大使得坡面两侧细沟网络丰富度和复杂度增加。

土壤侵蚀直接作用的结果是使地面破碎化。降雨强度和地面坡度的增加,导致浅沟侵蚀和细沟侵蚀加剧,地表更加破碎,但降雨强度和坡度对坡面侵蚀影响的方式和程度不同,各试验处理的最终地表形态也不尽同^[31-32],因此,需要对坡面浅沟形态特征进行量化,从坡面地形特征参数的变化方面探究坡面侵蚀的强弱。

2.2 不同降雨强度和坡度下浅沟形态特征参数

坡面浅沟形态特征参数可以量化反映坡面土壤侵蚀方式及侵蚀程度的强弱。基于各试验处理的 DEM 数据,利用式(1)~(4)计算了各试验处理下的浅沟形态特征参数(表1),量化了降雨强度和坡度对浅沟形态特征参数的影响。总体来看,降雨强度和坡度的增大均加快了坡面浅沟侵蚀过程,25°和 100 mm/h 条件下的浅沟平均宽度和深度分别较 15°和 50 mm/h 条件下的平均宽度和深度增大了 1.40 和 0.61 倍。

表1 不同降雨强度和坡度下浅沟形态特征参数

Table 1 Ephemeral gully morphological indicators under different rainfall intensities and slope gradients

雨强 Rainfall intensity/ (mm·h ⁻¹)	坡度 Slope gradient/(°)	浅沟沟槽平均宽度 Average width of ephemeral gully groove/cm	浅沟沟槽平均深度 Average depth of ephemeral gully groove /cm	沟道密度 Channel density $\rho/(m \cdot m^{-2})$	地面割裂度 Surface dissected degree D	浅沟复杂度 Ephemeral gully complexity c	浅沟沟槽宽深比 Breadth depth ratio of ephemeral gully groove R_{WD}
50	15	14.6±0.3a	17.4±1.4a	0.74±0.08a	0.13±0.01a	1.64±0.15a	0.82±0.05ab
	20	14.1±0.7a	17.9±1.1a	1.20±0.12c	0.20±0.02b	2.41±0.25bc	0.76±0.08ab
	25	18.0±0.5b	18.8±0.6a	1.34±0.09cd	0.23±0.01c	2.64±0.19cd	1.03±0.17bc
100	15	16.6±1.1ab	17.1±1.3a	0.97±0.04b	0.18±0.01b	2.07±0.07b	0.94±0.15b
	20	16.9±0.8ab	24.2±2.8b	1.41±0.15d	0.25±0.00c	2.78±0.28cd	0.65±0.22a
	25	35.0±2.4c	28.0±1.6c	1.48±0.11d	0.29±0.02d	2.84±0.23d	1.27±0.16c

注:同一列中的不同字母表示在 0.05 水平上差异性显著。

Note: Different letters in the same column represent significant difference at 0.05 level.

50 mm/h 降雨强度下,25°坡面的浅沟沟槽平均宽度与 15°和 20°坡面相比有显著差异,为 15°坡面浅沟沟槽平均宽度的 1.23 倍;而当降雨强度为 100 mm/h 时,15°坡面的浅沟沟槽平均宽度和平均深度与 50mm/h 雨强下的平均宽度和平均深度均无显著差异,20°坡面的浅沟沟槽平均深度则显著增加了 35.2%,25°坡面的浅沟沟槽平均宽度和平均深度与 50 mm/h 雨强下的平均宽度和平均深度均存在显著性差异,分别增加了 94.4%和 57.3%。这说明在极端降雨和陡峭地形条件下坡面浅沟沟槽发育速度明显加快,这也是造成黄土陡坡地土壤侵蚀严重的重要原因^[4]。

随着降雨强度和坡度的增大,沟道密度、地面割裂度和浅沟复杂度均呈现增大趋势,三者分别变化于 0.74~1.48 m/m²、0.13~0.29 和 1.64~2.84 之间。沟道密度和地面割裂度不仅由浅沟沟槽的形态所决定,也与坡面两侧

细沟形态及细沟网发育情况有关^[30,33];而浅沟复杂度主要是由汇入浅沟沟槽的细沟数量及形态决定。50 mm/h 降雨强度下,随着坡度的增加,虽然浅沟沟槽的平均宽度和平均深度变化不大,但坡面两侧细沟网发育却十分明显,细沟总长度、宽度和深度都明显增大,因此沟道密度、地面割裂度和浅沟复杂度均不断增大。而 100 mm/h 降雨强度下,坡度由 15°增加到 20°时,沟道密度、地面割裂度和浅沟复杂度均显著增大,而当坡度从 20°增加到 25°时,三者的数值变化则相对较小,说明在坡度为 20°时坡面两侧细沟已经发育完善,坡度增加并没有使细沟形态特征发生明显变化。

浅沟沟槽宽深比可以反映浅沟沟槽形状的变化。不同降雨强度和坡度下,浅沟沟槽宽深比为 0.65~1.27,其随降雨强度和坡度的增加而增大,这主要与浅沟沟槽的发育阶段和主导侵蚀过程有关(图3)。在 100 mm/h 的

降雨强度下，20°坡面的浅沟沟槽宽深比小于 15°和 25°坡面的浅沟沟槽宽深比，主要原因是 20°坡面条件下的浅沟沟槽在降雨结束时正处于下切侵蚀的活跃期，浅沟沟槽深度大，而沟槽宽度则与 15°坡面的浅沟沟槽宽度差异较小，最终使得 20°坡面的浅沟沟槽宽深比最小。在黄土陡坡地上，浅沟宽深比随着降雨侵蚀的进行会逐渐稳定在 1 左右^[34]，而不同的降雨强度和坡度条件使得浅沟沟槽在 70 min 的降雨结束后停留在以不同侵蚀过程为主导的各个阶段，造成浅沟沟槽形态的不同。

2.3 坡面侵蚀空间分布与浅沟横断面形态

为了进一步说明浅沟沟槽及坡面侵蚀形态的变化，对比分析坡面侵蚀强度的空间分布，将各场次降雨后利用测针板测量获得的高程数据导入 Surfer 软件，生成了 3 个试验处理 (a: 降雨强度为 50 mm/h 和坡度为 20°; b: 降雨强度为 50 mm/h 和坡度为 25°; c: 降雨强度为 100 mm/h 和坡度为 25°) 雨后的坡面 DEM，并利用式 (5) ~ (7) 在水平方向上根据 DEM 相邻格网数值关系进行方向导数计算得到了一阶导数，二阶导数和方向曲率格网表面的等值线图 (图 4)。

雨后坡面 DEM 等值线图展示了不同试验处理下坡面地形状况 (图 4); 一阶导数等值线图可以反映水平方向上坡度分布状况，在水平方向上坡度上升该格网点值为正值，坡度下降格网点的值为负值，而等值线密集的地方即为坡度变化剧烈的地方。对比坡面水流流路图 (图 2) 可知，等值线密集部位与水流流路即沟底位置重合，可用于估算细沟及浅沟长度。二阶导数等值线图 (图 4) 反映了水平方向上坡度的变化率，在特定的格网处，坡度上升，坡度变化率值为正，坡度下降，坡度变化率值为负，图中等值线主要密集分布在坡度值变化较快的地方，也就是坡面浅沟沟槽和细沟沟槽位置，因此等值线密集的区域可用于展示坡面细沟及浅沟的平面分布位置及所占表面积。方向曲率等值线图 (图 4) 展示了在水平方向上切面倾角变化率绝对值的变化情况，所有的格网值均为正值，图中等值线密集的地方为沟槽在水平方向上的曲率最大值，能够详尽展示沟底所在的位置，同时也反映了坡面侵蚀最严重的部位。

对比 3 个不同试验处理的雨后坡面地形和各方向导数等值线图可以发现，随着坡度和雨强的增大，浅沟沟槽处的等值线弯曲度增大，且浅沟沟槽两侧的细沟也明显增多加长，细沟处等高线弯曲度也增大 (图 4)。对比一阶导数等值线图可知 (图 4)，雨强和坡度的增加促进了坡面水流流路的发育，特别是浅沟沟槽两侧细沟水流流路逐渐加长并汇入了浅沟沟槽，试验处理 A 中浅沟沟槽两侧的断续细沟没有完全连接，而 B 处理中细沟水流流路连接形成连续细沟，C 处理中细沟水流流路则更加明显。二阶导数等值线图则显示，坡面上细沟和浅沟表面积随着坡度和降雨强度的增大也明显增大。方向曲率等值线图展示了侵蚀最严重的沟底位置，对比不同处理的方向曲率等值线图可知，随着坡度从 20°增加到 25°，试

验处理 B 中不仅浅沟沟槽沟底下切侵蚀强度明显增大，浅沟沟槽两侧的细沟沟底面积也明显增多，而且坡面右侧还出现了一条连续的细沟；而随着降雨强度从 50 增大到 100 mm/h，试验处理 C 中浅沟沟槽两侧的细沟发育明显加强，侵蚀严重的沟底分布面积明显加大。

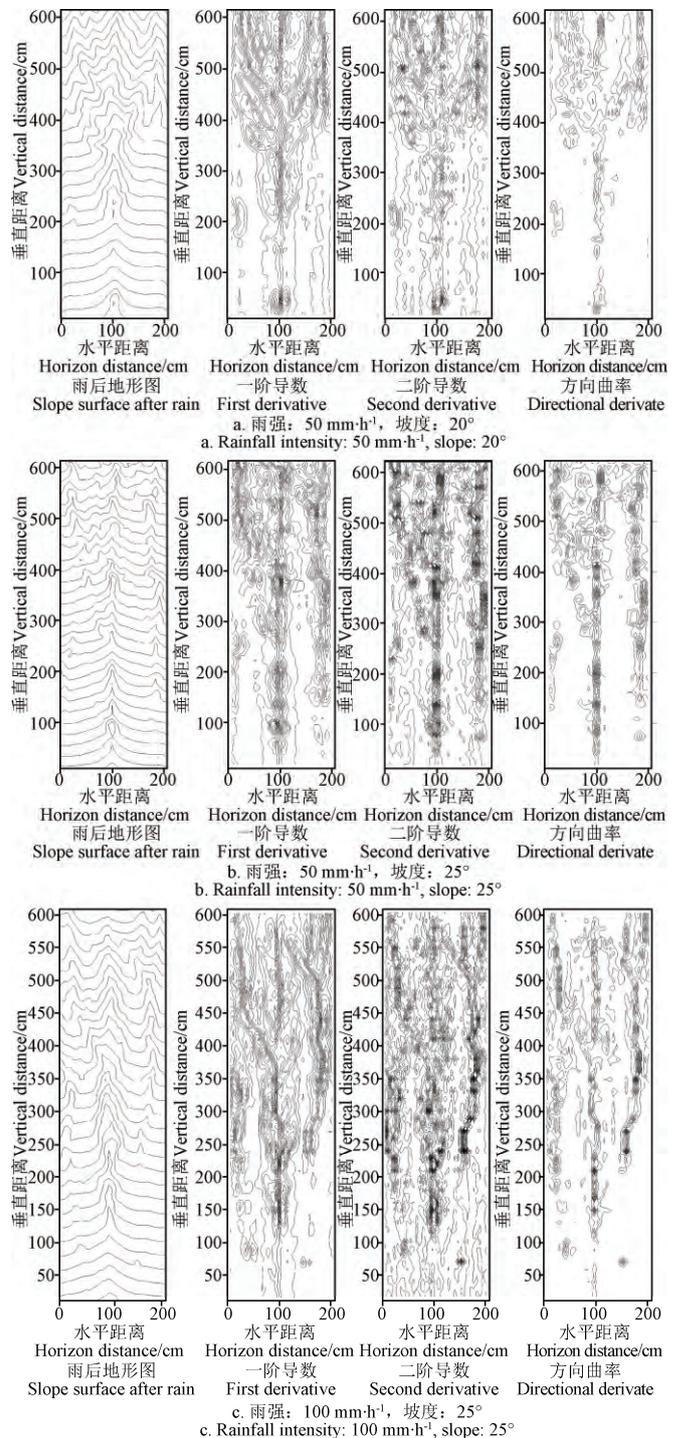


图 4 雨后坡面 DEM 与水平方向上各方向导数等值线图
Fig.4 Contour map of slope surface after rain and its directional derivatives grids in horizon direction

为展示坡面浅沟和细沟横断面形态，基于图 3 的等值线文件创建了各试验处理 3 m 坡长处的剖面线文件，并统计了该剖面线上一阶导数、二阶导数、方向曲率和

降雨后坡面 DEM 的格网表面值 (图 5)。

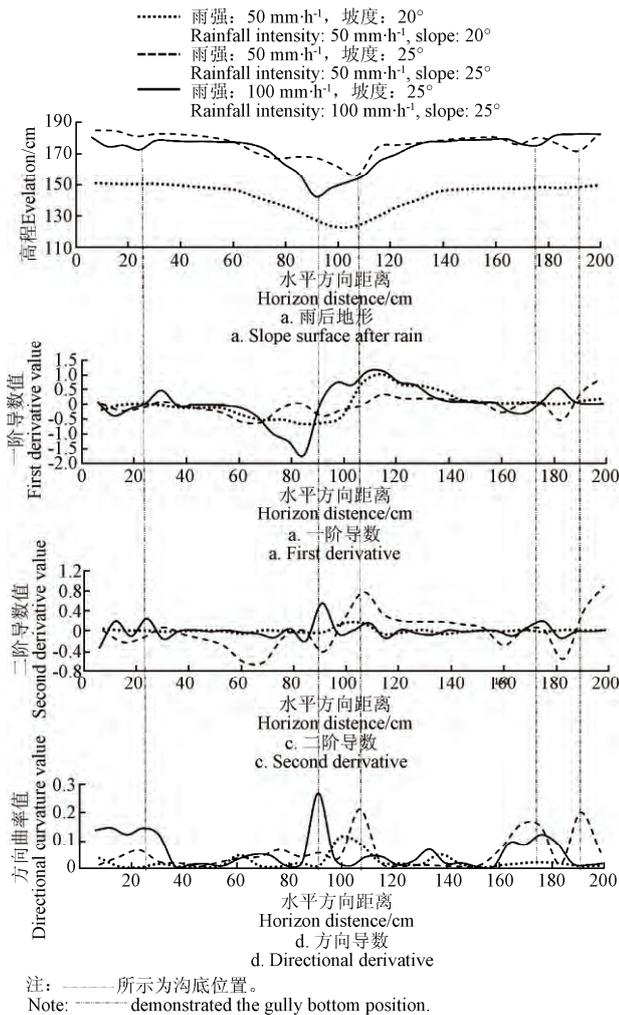


图5 雨后坡面 DEM 与各方向导数格网在 3 m 坡长处剖面图
Fig.5 Profile map of digital elevation model slope surface after rain and directional derivatives grids at 3 m of slope length

对比不同处理雨后坡面 DEM 的剖面图可知(图 5a), 在 3 m 坡长处, 随着降雨强度与坡度的增大, 浅沟沟槽深度变大, 浅沟沟槽形态逐渐由宽浅型向宽深比为 1 变化, 浅沟沟槽两侧细沟也增多, 细沟侵蚀强度变大。50 mm/h 降雨强度下, 20°坡面浅沟沟槽宽 80 cm、深 24 cm, 25°坡面的浅沟沟槽宽 75 cm、深 25 cm, 均呈现宽浅型, 而在 100 mm/h 和 25°条件下, 浅沟沟槽宽度为 54 cm, 深为 38 cm, 同时两侧坡面上也有 3 条细沟发育, 左侧槽边有一条宽为 6 cm 深为 5 cm 的细沟, 其旁有一条宽为 25 cm, 最大深度为 8 cm 细沟, 而右侧坡面细沟宽度为 13 cm, 深度为 5 cm (图 5a)。可见, 降雨强度和坡度的增大促进了坡面浅沟沟槽和两侧细沟的发育, 而浅沟沟槽的深度和宽度明显大于两侧细沟侵蚀, 是坡面侵蚀最严重的部位。对比各处理的不同方向导数的格网值可知, 一阶导数表示的是雨后坡面 DEM 格网在水平方向上的坡度, 所以在沟底位置一阶导数的格网表面值为 0 (图 5b); 二阶导数值表示的是坡度的变化率, 因此, 原始坡面沟底位置即一阶导数值为 0 的地方, 二阶导数值出现峰值 (图 5c); 类似的, 方向曲率格网表

面值在沟底位置最大, 且所有格网表面值均为正值 (图 5d)。由各方向导数剖面图可知, 各方向导数格网表面值可反映坡面的侵蚀分布状况, 展示坡面上细沟和浅沟沟底的位置。

3 结论

在长 8 m、宽 2 m、深 0.6 m 的试验土槽上制作了浅沟发育初期的雏形, 利用模拟降雨和径流冲刷 (10 L/min) 相结合的试验方法, 定量研究了不同降雨强度和坡度条件下坡面浅沟形态特征, 结论如下:

1) 降雨强度和坡度的增大均加快了坡面浅沟侵蚀过程, 25°和 100 mm/h 条件下的浅沟平均宽度和深度分别较 15°和 50 mm/h 条件下的平均宽度和深度增大 1.40 和 0.61 倍。坡度的增加使两侧细沟汇入浅沟沟槽所需的坡长变大, 细沟汇入浅沟沟槽时与浅沟沟槽所夹得锐角角度也逐渐变小; 而降雨强度的增大则缩短了细沟向浅沟沟槽汇水所需的坡长。

2) 受浅沟沟槽形态和坡面两侧细沟网发育情况的影响, 沟道密度、地面割裂度和浅沟复杂度均随着降雨强度和坡度的增大呈现增大趋势, 三者分别变化于 0.74~1.48 m/m²、0.13~0.29 和 1.64~2.84 之间。而浅沟宽深比受浅沟发育过程中不同主导侵蚀过程的影响, 在不同降雨强度和坡度的试验条件下变化于 0.65~1.27 之间。

3) 方向导数格网等值线图可以反映坡面浅沟和细沟的长度、表面积及侵蚀最严重的沟底位置, 剖面线也可以展示坡面上细沟和浅沟沟槽底部的位置。

目前, 有关浅沟形态特征及建立基于浅沟形态的坡面侵蚀预报模型研究有待加强。

[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. Soil erosion classification in the loessial region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99—115. (in Chinese with English abstract)
- [2] Foster G R. Understanding ephemeral gully erosion[J]. Soil Conservation Service, 1986, 2: 90—125.
- [3] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48—59, 116.
Zheng Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion processes research[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48—59, 116. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.
- [5] 崔明, 蔡强国, 张永光, 等. 漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 59—65.
Cui Ming, Cai Qiangguo, Zhang Yongguang, et al. Development of ephemeral gully during rainy season in the slope land in rolling-hill black-soil region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(8): 59—65. (in Chinese with English abstract)
- [6] Di Stefano C, Ferro V, Pampaloni V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy[J]. Catena, 2013, 101: 226—234.
- [7] 武敏, 郑粉莉. 浅沟侵蚀过程及预报模型研究进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 113—116.
Wu Min, Zheng Fenli. Research progress on ephemeral gully erosion process and its prediction model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 113—116. (in Chinese with English abstract)
- [8] Wilson G. Understanding soil-pipe flow and its role in ephemeral gully erosion[J]. Hydrological processes, 2011, 25(15): 2354—2364.
- [9] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50(2): 91—133.
- [10] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 545—549.
Hu Gang, Wu Yongqiu, Liu Baoyuan, et al. Growth characteristic of ephemeral gully in rolling hills of black soils in northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 545—549. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 shallow gully erosion on slope farmland in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [12] Torri D, Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130: 73—85.
- [13] Maignard A, Van Dyck S, Biélers 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.
- [14] Cheng H, Zou X, Wu Y, 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.
- [15] 秦伟, 朱清科, 赵磊磊, 等. 基于 RS 和 GIS 的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 58—64.
Qin Wei, Zhu Qingke, Zhao Leilei, et al. Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 58—64. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 with English abstract)
- [17] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 114—123.
Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. Effect of tillage on runoff and sediment yields and morphology development characteristic of ephemeral gully in loessial region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 114—123. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姜永清, 王占礼, 胡光荣, 等. 瓦背状浅沟分布特征分析[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 181—184.
Jiang Yongqing, Wang Zhanli, Hu Guangrong, et al. Distribution features of shallow gully[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 181—184. (in Chinese with English abstract)
- [19] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion[J]. Catena, 1999, 37(3): 393—399.
- [20] Capra A, Mazzara L M, Scicolone B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy[J]. Catena, 2005, 59(2): 133—146.
- [21] Nachtergaele J, Poesen J, Sidorchuk A, et al. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(10): 1935—1953.
- [22] Taguas E V, Yuan Y, Bingner R L, et al. Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements: A case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model[J]. Catena, 2012, 98: 1—16.
- [23] 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.
- [24] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177—178.
- [25] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J]. 水土保持通报, 1987, 7(1): 38—44.
Zhou Peihua, Wang Zhanli. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1987, 7(1): 38—44. (in Chinese with English abstract)
- [26] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. 泥沙研究, 2005(4): 1—6.
Jiang Zhongshan, Zheng Fenli, Wu Min. Prediction model of water erosion on hillslopes[J]. Journal of Sediment Research, 2005(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王红雷, 王秀茹, 王希, 等. 采用 SCS-CN 水文模型和 GIS 确定雨水集蓄工程的位置[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 108—114.
Wang Honglei, Wang Xiuru, Wang Xi, et al. Identification of potential rainwater harvesting sites using SCS-CN and GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 108—114. (in Chinese with English abstract)

- [28] Vinci A, Brigante R, Todisco F, et al. Measuring rill erosion by laser scanning[J]. *Catena*, 2015, 124: 97–108.
- [29] 白世彪, 王建, 常直杨. Surfer 10 地学计算机制图[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 205–211.
- [30] Shen H, Zheng F, Wen L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology[J]. *Geomorphology*, 2015, 231: 193–201.
- [31] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162–170. Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM)*, 2015, 46(7): 162–170. (in Chinese with English abstract)
- [32] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12): 1456–1467.
- [33] Brunton D A, Bryan R B. Rill network development and sediment budgets[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(7): 783–800.
- [34] 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 Jianguo, 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 with English abstract)

Quantification study of rainfall intensity and slope gradient impacts on ephemeral gully morphological characteristic on steep loessial hillslope

Xu Ximeng¹, Zheng Fenli^{1,2*}, Wu Min³

(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 CAS & MWR, Yangling 712100, China; 3. College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Ephemeral gully is formed in the cycle of concentrated flow and tillage practices, and contributed a lot to the sediment yield on the loessial hillslope as well as in the watershed. Ephemeral gully morphology is the base of establishing ephemeral gully erosion prediction model on the steep loessial hillslope. Thus, to quantify the ephemeral gully morphological characteristics on steep loessial hillslope in different rainfall intensities and slope gradients, an 8 m long, 2 m wide and 0.6 m deep slope adjustable soil pan was used to make an initial ephemeral gully channel on the soil bed according to the topographic characteristics of natural ephemeral gully after tillage and before rainy season. The initial ephemeral gully was placed at the middle of the soil bed with a depth of 12 cm. The soil used in this study was loess soil (fine-silty and mixed, with 28.3% sand, 58.1% silt, 13.6% clay), classified as Calcic Cambisols (USDA Soil Taxonomy). Soil materials were collected from 0 to 20 cm in the Ap horizon of a well-drained site in Ansai County, Shaanxi Province, and packed according to natural soil structure of the farmland on Loess Plateau. Two rainfall intensities (50 and 100 mm/h) and three typical slopes on which ephemeral gully occurred and developed (15°, 20°, and 25°) were designed in this experiment. Simulated rainfall and runoff scouring experiments were carried out at rainfall simulation laboratory of the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau. Needle board method was used to measure the topography after 70 min experiment and the DEMs (digital elevation models) were generated in Surfer 10 with a resolution of 3 cm × 10 cm. The results showed that, the increasing of rainfall intensity and slope gradient accelerated the ephemeral gully erosion processes on the steep loessial hillslope. Average ephemeral gully width and depth in 25° and 100 mm/h condition were 1.40 and 0.61 times larger than those in 15° and 50 mm/h condition. Based on DEMs after rain and flow path figures, it could be concluded that the increasing of slope gradient increased the slope length required for the converging of rills and ephemeral gully channel, and the angle of rill and ephemeral gully channel at converging point was decreased; while the increasing of rainfall intensity decreased the slope length required for the converging of rills and ephemeral gully channel. Gully density, surface dissected degree and tortuosity complexity of ephemeral gully increased with the increase of rainfall intensity and slope gradient, varying from 0.74 to 1.48 m/m², from 0.13 to 0.29, and from 1.64 to 2.84, respectively, while ephemeral gully channel width to depth ratio ranged from 0.65 to 1.27 and was the smallest when slope gradient was 20°. Directional derivative distribution was generated from original DEMs after rain according to the relationship between the neighbor grids, and it could be concluded that contour map of directional derivative grids reflected the length, surface area and gully bottom position of ephemeral gully and rills. More studies should be done on the ephemeral gully morphology and hillslope ephemeral gully erosion prediction model.

Keywords: soils; erosion; runoff; ephemeral gully; morphological characteristics; steep loessial hillslope; simulated experiment; directional derivatives