

玉米秸秆覆盖缓冲带对细沟侵蚀及其水动力学特征的影响

徐锡蒙¹, 郑粉莉^{1,2*}, 吴红艳¹, 覃超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)

摘要: 玉米秸秆覆盖缓冲带是一项有效的坡面水土保持措施, 为探究其减少细沟侵蚀的效果及水动力学机理, 在室内人工模拟连续降雨条件下, 选取黄土高原高强度侵蚀性降雨标准和细沟发育典型的典型坡度, 根据细沟发育的不同阶段, 研究了不同布设部位(坡面中部 5 m 和坡面下部 7 m)的秸秆覆盖缓冲带对细沟侵蚀及其水动力学特征的影响。结果表明: 与裸露处理相比, 玉米秸秆覆盖缓冲带可以减少坡面侵蚀量 27.2%~54.8%, 减少细沟侵蚀量 40.8%~59.2%, 减小细沟侵蚀量对坡面总侵蚀量的贡献率。对于细沟形态, 缓冲带可减少细沟割裂度 23.0%~32.0%, 减少细沟平均深度 6.7%~10.5%。比较 2 种布设部位, 在坡面细沟发育后期, 坡面下部 7 m 处布设的秸秆缓冲带可以取得更好地减少侵蚀和约束细沟形态变化的效果。对于单条细沟, 裸露坡面上的细沟宽度沿坡长方向呈现约 1.2 m 长的周期性变化规律, 而秸秆缓冲带改变了细沟宽度沿坡长方向的周期性变化趋势, 此外还通过拦截淤积上方来沙减小了布设位置细沟侵蚀深度, 通过拦截径流保护下方有限长度内的细沟。分析其水动力学原因可知, 玉米秸秆覆盖缓冲带可使细沟水流向缓层流流态方向延伸, 与缓冲带上方相比, 秸秆缓冲带下方的细沟水流流速显著减小 19.6%~21.9%, 雷诺数和佛汝德数分别减少了 29.6%~37.9% 和 8.3%~18.5%, 而通过秸秆缓冲带后, 细沟水流 Darcy-weisbach 阻力系数增加了 22.4%~43.3%, 水流剪切力、单位水流功率和断面单位能量分别减小 13.6%~21.5%、20.0%~21.0% 和 9.5%~21.0%, 径流能量和侵蚀能力的降低最终导致了坡面总侵蚀量的减小。因此, 在坡面上每隔 5~7 m 布设缓冲带可以有效的削弱坡面径流侵蚀能力, 减少坡面细沟侵蚀量和总侵蚀量。该研究结果可为类似地形条件下的坡面水土保持措施合理配置提供理论基础。

关键词: 降雨; 侵蚀; 水动力学; 玉米秸秆覆盖缓冲带; 细沟; 形态

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.018

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-24-0111-09

徐锡蒙, 郑粉莉, 吴红艳, 覃超. 玉米秸秆覆盖缓冲带对细沟侵蚀及其水动力学特征的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 111-119. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.018 http://www.tcsae.org

Xu Ximeng, Zheng Fenli, Wu Hongyan, Qin Chao. Impacts of cornstalk mulching buffer strip on rill erosion and its hydrodynamic character[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 111-119. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.24.018 http://www.tcsae.org

0 引言

合理配置坡面水土保持措施可以改变坡面水文侵蚀状况与水流动力学特征, 减少坡面侵蚀量^[1-3], 还对减少流域内的侵蚀泥沙有重要意义^[4-6]。植被缓冲带可以通过降低径流流速^[7], 促使泥沙沉积^[8], 减少坡面侵蚀量^[9], 是一项重要的水土保持措施。因此, 国内外学者对植被缓冲带的不同布设方式、缓冲带对坡面水文侵蚀过程的影响等^[10-12]进行了大量的探讨。作物秸秆覆盖同样是一种十分有效的坡面水土保持措施, 具有明显地保持水土、减少坡面侵蚀的作用^[13-14]。然而目前秸秆覆盖防治侵蚀的研究中, 秸秆覆盖方式大多以全坡面均匀覆盖

为主, 以玉米秸秆为原材料的研究相对薄弱, 且大多为残渣覆盖^[15]。

在黄土高原地区, 玉米秸秆资源丰富, 很多玉米秸秆在收获后没有得到充分的利用。此外, 黄土坡耕地经过侵蚀性降雨后细沟侵蚀严重。在多次野外调查过程中, 笔者发现部分农民直接将整株玉米秸秆弃置在裸坡耕地上。这便引发了笔者的思考, 将整株玉米秸秆以缓冲带的形式直接覆盖在裸露坡面上会取得怎样地减少细沟侵蚀的效果? 玉米秸秆覆盖缓冲带减少侵蚀的机理是什么? 因此, 本文通过室内人工模拟连续降雨试验, 探讨在黄土高原典型高强度侵蚀性降雨和细沟发育典型的典型坡度条件下, 玉米秸秆覆盖缓冲带对坡面细沟侵蚀、细沟水流动力学特征的影响, 以期黄土高原坡面水土保持措施配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学水土保持研究所人工模拟降雨大厅(108°4'13"E、34°16'37"N)进行。供试土壤为安塞县(109°19'23"E、36°51'30"N)黄绵土, 采样地点位

收稿日期: 2015-07-28 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271299); 水利部公益性行业专项课题资助项目(201201083)

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

于当地典型的具有犁底层的农耕地, 根据耕层深度 (约为表土 20 cm) 分 2 层 (耕作层和犁底层) 采集土样, 具有很好的代表性。用吸管法^[16]测定土壤颗粒组成并根据美国农业部土壤质地分级制确定试验土壤的颗粒组成: 砂粒 (>50 μm) 质量分数占 28.3%、粉砂粒 (50~2 μm) 质量分数占 58.1%、黏粒 (<2 μm) 质量分数占 13.6%。有机质质量分数为 5.9 g/kg (重铬酸钾-外加加热法)。

选用由日本引进的下喷式降雨系统, 降雨高度 18 m, 能保证所有降雨雨滴达到终点速度, 降雨均匀度 >80%, 能最大程度的模拟天然降雨的雨滴直径与雨滴分布情况^[17]。供试土槽为固定式液压升降钢槽, 长和宽分别为 10 和 3 m, 深 0.5 m, 钢槽底部每米长排列 4 个排水孔 (直径为 2 cm), 以保证试验过程排水良好, 土槽下端设置集流口收集径流泥沙样品。

1.2 试验设计

细沟形成后坡面土壤侵蚀总量将增加几倍至几十倍^[18], 因此有必要针对细沟侵蚀的特点进行试验设计。根据黄土坡面细沟发生的典型坡度设计试验坡度为 20°。根据黄土高原地区侵蚀性降雨标准 ($I_5=1.52 \text{ mm/min}$)^[19], 设计

降雨强度为 100 mm/h, 单场降雨历时 30 min。

为了定量研究细沟侵蚀的水力学特性及其与细沟形态的关系, Foster 等^[20]根据野外形成的细沟在实验室内制作了相同的模型, 观测细沟流流速对沟壁扩张和沟底下切的影响。因此, 为了实现对坡面单条细沟发育情况的连续观测, 并且保证试验初始条件的一致性, 每次降雨试验前均在坡面斜坡长 5~9 m 的平整坡面的中心处制作锥形细沟模型, 宽 25 cm, 沟底与两侧坡面高差 15 cm, 锥形细沟的宽度和深度均符合黄土高原耕地细沟宽度分布范围 (<30 cm) 和深度分布范围 (<20 cm)^[21]。

试验采用连续降雨, 设计裸露处理用于对比, 根据裸露处理地表细沟侵蚀的发育过程设计 2 种覆盖处理。裸露坡面在经过 1 场 30 min 的降雨后, 坡面中部细沟发育速度较快, 因而 2 个覆盖处理均在坡面中部斜坡长 4.5~5.5 m 处 (约 5 m) 布设秸秆缓冲带; 而在第 3 场降雨时, 裸露处理的坡面中部和下部出现了 2 个细沟发育活跃的区域, 因此, 覆盖处理 I 中的秸秆缓冲带依然布设在斜坡长 4.5~5.5 m 处, 而覆盖处理 II 中的秸秆缓冲带布设在坡面下部斜坡长 6.5~7.5 m (约 7 m) 处 (表 1)。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

| 试验处理 Experimental treatment | 降雨强度 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹) | 坡度 Slope gradient/(°) | 玉米秸秆缓冲带布设位置 Cornstalk buffer position on hillslope | | |
|--------------------------------|--|--------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | 第 1 场降雨 1 st rain | 第 2 场降雨 2 nd rain | 第 3 场降雨 3 rd rain |
| 裸土 Bare land | | | 无 No buffer | 无 No buffer | 无 No buffer |
| 覆盖处理 I Mulching treatment I | 100 | 20 | 无 No buffer | 4.5~5.5 m | 4.5~5.5 m |
| 覆盖处理 II Mulching treatment II | | | 无 No buffer | 4.5~5.5 m | 6.5~7.5 m |

注: 每个试验处理重复 2 次。

Note: Each treatment has 2 replicates.

玉米秸秆选用杨凌常见的自然风干秸秆, 秸秆缓冲带长与土槽宽度相同为 3 m, 宽度为 1 m, 由于秸秆缓冲带是在细沟发育的坡面上铺设的, 为了保证坡面平整, 在铺设前先用截断的约 5 cm 长的秸秆段填充缓冲带布设部位下方的细沟, 再将整株玉米秸秆作为缓冲带铺设在坡面上, 覆盖厚度为 1 株玉米秸秆的直径, 约 5 cm (图 1)。

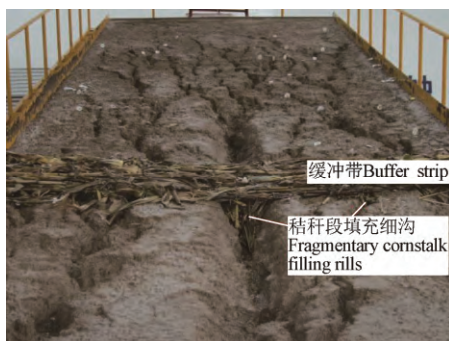


图 1 秸秆缓冲带布设方式

Fig.1 Layout of cornstalk buffer

1.3 试验过程

试验前, 不对供试土样进行过筛研磨处理, 尽量保持土壤原有结构免遭破坏。装填土槽前, 先用纱布填充土槽底部的排水孔, 然后在土槽底部填 10 cm 厚天然细

沙作为透水层, 确保试验过程中土槽排水良好; 然后在细沙层之上覆盖纱布, 装填 10 cm 厚的黄绵土, 控制容重为 1.25 g/cm³, 用于模拟犁底层; 犁底层之上填装 20 cm 厚的黄绵土, 容重控制在 1.10 g/cm³, 用于模拟耕层土壤。为保证装土的均匀性, 每 5 cm 填装 1 层, 每填完一层土后, 将土层表面用齿耙耙松, 再填装下一层土壤, 保证 2 个土层能够很好地接触。在填土时将试验土槽四周边壁压实, 尽可能减小边界效应的影响。

试验过程中由于土槽体积庞大以及降雨场地条件限制, 每次降雨试验时只有 1 个土槽进行试验, 填装好土槽后, 根据试验设计随机选择试验处理布设秸秆缓冲带并进行 3 场连续降雨试验。随后将土槽置于自然状态下风干, 填入新土并平整土槽表面, 制作锥形沟, 然后随机选择试验处理进行新一轮降雨试验。

为保证不同试验处理前期地表土壤水分条件的一致性, 正式降雨的前 1 天采用 0.5 mm/min 的雨强, 将试验土槽坡度调至 3°, 进行预降雨至坡面产流为止。正式降雨开始前率定雨强, 保证实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于 5% 且降雨均匀度大于 80%。正式降雨开始后仔细观察坡面产流情况, 记录初始产流时间并连续接取径流泥沙样。降雨结束后, 去除径流样的上层清液, 然后放入设置恒温为 105 °C 干燥箱, 烘干后称量泥沙质量,

计算坡面总侵蚀量。降雨过程中, 坡面产流后便开始测量试验土槽不同断面细沟内的水流流速, 之后每隔 5 min 测定不同监测断面细沟内的水流流速, 用直尺测量水深。

每次降雨结束后, 用直尺对所有具有明显沟缘且深度 > 1 cm 的细沟进行测量, 沿着细沟走向每隔 5 或 10 cm 详细测量细沟的位置坐标及细沟的宽度和深度, 在变化剧烈的位置进行加密测量, 即将每一条细沟划分为多个小段进行测量, 以此来减小因细沟形态不规则而造成的测量误差。

1.4 测定及计算项目

1.4.1 细沟平面形态参数、细沟侵蚀量和细沟平均深度

细沟累积长度 (R_L) 是指坡面上出现的所有细沟的长度之和, 其值大小能够反映细沟对坡面的切割程度。细沟总面积 (R_S) 是指坡面上所有细沟表面积的总和。

由于下垫面情况的不同以及水流方向的弯曲, 细沟并非沿程直线发育而存在水平方向的位置偏移, 因而把细沟长度简化为以量测间距 (5 或 10 cm) 和水平偏移长度为直角边所组成的直角三角形的斜边长度; 而计算细沟总面积时, 把每一条细沟每一个测量段的细沟面积简化为梯形计算^[21]:

$$R_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} \sqrt{(R_{ip_{j+1}} - R_{ip_j})^2 + R_{il_j}^2}, \quad (1)$$

$$R_S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} \left[\frac{(R_{iw_{j+1}} + R_{iw_j}) \cdot R_{il_j}}{2} \right]. \quad (2)$$

式中 R_{ip_j} 、 $R_{ip_{j+1}}$ 分别代表第 j 次和第 $j+1$ 次量测第 i 条细沟的距土槽侧边的距离, cm; R_{il_j} 为第 j 次量测第 i 条细沟的量测间距, 为 5 或 10 cm; R_{iw_j} 、 $R_{iw_{j+1}}$ 分别代表第 j 次和第 $j+1$ 次量测第 i 条细沟的宽度, cm; n 为坡面细沟总条数; m 为量测次数。

细沟密度^[22]为 R_L 与研究区总面积即土槽面积的比值, 表征单位面积坡面上细沟总长度的变化规律, 可以反映细沟发育特征; 地面割裂度是研究区沟道表面积占研究区总面积的百分数, 本研究用细沟割裂度表征地表的破碎程度, 细沟割裂度参照地面割裂度进行定义, 是指坡面细沟总面积 (R_S) 与土槽面积之比, 可以综合反映细沟沟头溯源侵蚀和沟壁扩张的程度。

细沟侵蚀量一般采用容积法进行计算, 即首先根据测量的细沟形态计算细沟体积, 再乘以土壤容重。但由于细沟形状不规则, 容积法估算的细沟侵蚀量存在误差, 因此, 有研究^[23]建议用填土法估算细沟侵蚀量, 并建立了 2 种方法测得的细沟侵蚀量的关系。所以, 本研究基于容积法与填土法估算细沟侵蚀量的关系式^[23], 将容积法估算的细沟侵蚀量换算为填土法估算的细沟侵蚀量, 即本研究中的细沟侵蚀量。

而细沟平均深度可以通过坡面上的细沟侵蚀总体积^[23]除以试验土槽斜坡表面细沟总面积计算。

1.4.2 入渗量

根据水量平衡原理, 在次降雨过程中, 坡面水量平衡方程为

$$P + R_m = R_{out} + I + E + T. \quad (3)$$

式中 P 为降雨量, mm; R_m 为外部输入试验土槽的径流量, mm; R_{out} 为试验土槽产生的径流量, mm; I 为土壤入渗量, mm; E 为蒸发量, mm; T 为蒸腾量, mm。

在次降雨强度为 100 mm/h 和降雨历时为 30 min 条件下, 降雨量为 50 mm; 试验过程中无外部汇水情况, 即外部输入试验土槽径流量为 0; 试验土槽产生的径流量可通过采集得到的径流样计算得出。对于蒸发量, 由于降雨时间较短, 且降雨过程中空气湿度达到 90% 以上, 所以蒸发量可以忽略不计; 对于蒸腾量, 由于试验土槽的地表处理为裸露休闲 (无植物), 因而蒸腾量为 0。因此, 次降雨过程中的土壤入渗量 (I) 为

$$I = P - R_{out}. \quad (4)$$

1.4.3 水动力学参数计算

本文选取径流流速 (V)、雷诺数 (Re)、佛汝德数 (Fr) 和 Darcy-weisbach 阻力系数 (f) 4 个水力学参数分析秸秆缓冲带覆盖对坡面细沟水流流态和特征的影响。考虑到使用染色剂示踪法测定的流速为优势流流速, 因此将实测流速乘以修正系数 0.75, 作为水流断面平均流速^[12]。降雨过程中用高锰酸钾染色法测量细沟沟内水流流速。

雷诺数、佛汝德数和 Darcy-weisbach 阻力系数应用明渠水力学公式计算^[24-25]。

假定侵蚀沟横断面为矩形, 那么

$$R = \frac{B \cdot h}{B + 2h}. \quad (5)$$

式中 R 为水力半径, B 为侵蚀沟宽度, cm; h 为水深, cm。

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu}. \quad (6)$$

式中 V 为流速, cm/s; ν 为水流的运动黏滞性系数, 主要与水温有关, 用经验公式 $\nu = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2)$ 计算, 其中 t 为试验时水温, °C。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot R}}. \quad (7)$$

式中 Fr 为佛汝德数, g 为重力加速度, 980 cm/s²。

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot R \cdot J}{V^2}. \quad (8)$$

式中 f 为 Darcy-weisbach 阻力系数; J 为水力坡度, 近似为坡度的正切值。

坡面侵蚀过程的实质是水流做功、能量不断消耗的过程, 因而, 本文选用径流剪切力 (τ)、单位水流功率 (P_t)、过水断面单位能量 (E) 3 个侵蚀动力学参数描述秸秆缓冲带消耗径流能量, 降低径流侵蚀能力的作用^[26]。

径流剪切力是破坏和分散土壤颗粒的主要动力。Foster 等^[27]提出了水流剪切力的计算公式为

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J. \quad (9)$$

式中 τ 为径流剪切力, Pa; γ 为水的重度, $\gamma = \rho \cdot g$, ρ 为水的密度, g/cm³。

基于前人研究结果和大量的试验数据, Yang^[28]提出了适用于明渠水流的单位水流功率的计算公式, 而 Moor 和 Burch^[29]随后用该公式进行了坡面和细沟侵蚀率的计

算, 试验结果表明该公式能够较准确的预测坡面和细沟水流输沙率。在长度为 x 、总落差为 y 的一条明渠上, 单位质量的水体所具备的用于输送水和泥沙的功率为

$$P_r = \frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dy}{dx} = V \cdot J. \quad (10)$$

式中 P_r 为单位水流功率, cm/s。

过水断面单位能量是指以过水断面最低点作为基准点的单位水重的动能和势能之和^[30], 其计算方法如下

$$E = \frac{a \cdot V^2}{2g} + h. \quad (11)$$

式中 a 为动能校正系数, 这里取为 1。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖缓冲带对坡面径流与侵蚀的影响

秸秆覆盖缓冲带可以明显增大坡面土壤入渗量, 改变坡面水分循环过程(表 2)。与裸土处理的第 2 场降雨相比, 覆盖处理 I 和 II 中 5 m 处的秸秆覆盖缓冲带使坡面土壤入渗量增加了 1.5~3.6 倍; 与裸土处理的第 3 场降雨相比, 覆盖处理 I 中 5 m 处的秸秆覆盖缓冲带使坡面土壤入渗量增加了 1.7 倍, 覆盖处理 II 中 7 m 处的秸秆覆盖缓冲带使坡面土壤入渗量增加了 1.6 倍; 比较 3 场降雨的总入渗量, 2 个覆盖处理的总入渗量分别增加了 76.8% 和 55.3%, 坡面水文条件的改变对坡面侵蚀有明显影响。

表 2 不同处理的坡面径流量、侵蚀量及细沟侵蚀量

Table 2 Runoff volume, sediment yield and rill erosion amount in different treatments

| 处理 Treatment | 入渗量 Runoff volume/L | | | | 侵蚀量 Sediment yield/kg | | | | 细沟侵蚀量 Rill erosion amount/kg | | | | 细沟侵蚀量占总侵蚀量百分数 Proportion of rill erosion in total/% | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain | 总量 Total | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain | 总量 Total | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain | 总量 Total | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain | 总量 Total |
| | 裸土 Bare land | 204.1 ±36.3 | 32.9 ±18.4 | 50.7 ±11.7 | 287.8 ±28.9 | 399.5 ±31.4 | 478.0 ±27.4 | 394.9 ±39.2 | 1272.4 ±45.1 | 246.6 ±16.3 | 291.1 ±24.6 | 238.2 ±12.7 | 793.9 ±30.9 | 66.2 | 60.9 | 60.3 |
| 覆盖处理 I Mulching treatment I | 220.9 ±31.2 | 152.9 ±28.7 | 135.0 ±11.5 | 508.8± 58.7 | 373.3 ±36.3 | 348.2 ±23.7 | 262.2 ±19.5 | 983.7 ±49.2 | 238.4 ±12.8 | 167.3 ±10.5 | 140.9 ±8.7 | 576.6 ±27.5 | 63.9 | 48.0 | 53.7 | 55.6 |
| 覆盖处理 II Mulching treatment II | 231.7 ±38.8 | 82.2 ±20.3 | 132.8 ±18.4 | 446.7 ±40.2 | 392.4 ±35.7 | 320.8 ±12.7 | 178.3 ±13.8 | 891.4 ±27.5 | 257.3 ±5.9 | 149.5 ±13.1 | 97.2 ±7.2 | 504.0 ±26.4 | 65.6 | 46.6 | 54.5 | 56.5 |

3 个处理中第 1 场降雨后, 在坡面形成细沟, 坡面总侵蚀差异较小(表 2), 为第 2 场降雨试验提供对比的基础。2 个覆盖处理由于在第 2 场降雨前在相同位置布设了缓冲带, 侵蚀总量差异较小, 且 2 场降雨后的细沟平面形态参数差异也较小(表 3), 这都说明了第 2 场降雨中 2 个处理重复性良好, 可为第 3 场降雨提供相对一致的下垫面。

表 3 不同试验处理下的细沟平面形态参数

Table 3 Rill horizon morphology characteristics in different treatments

| 平面形态参数 Horizon morphologic parameter | 裸土 Bare land | | | 覆盖处理 I Mulching treatment I | | | 覆盖处理 II Mulching treatment II | | |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain | 第 1 场雨 1 st rain | 第 2 场雨 2 nd rain | 第 3 场雨 3 rd rain |
| | 细沟累积长度 Accumulated rill length/m | 93.8 | 82.1 | 78.8 | 84.4 | 73.3 | 77.7 | 81.2 | 66.2 |
| 细沟密度 Rill density/ (m·m ⁻²) | 3.13 | 2.74 | 2.63 | 2.81 | 2.44 | 2.59 | 2.71 | 2.21 | 2.35 |
| 细沟总面积 Total rill surface area/m ² | 5.0 | 7.9 | 10.0 | 5.3 | 6.9 | 7.7 | 4.6 | 6.4 | 6.8 |
| 细沟割裂度 Rill dissected degree/% | 16.7 | 26.3 | 33.3 | 17.7 | 23.0 | 25.7 | 15.2 | 21.2 | 22.7 |
| 细沟平均深度 Rill average depth/cm | 15.8 | 21.1 | 23.8 | 13.5 | 17.6 | 21.3 | 16.9 | 19.2 | 22.2 |

第 2 场降雨中, 在坡面侵蚀发育的活跃部位(坡面中部)布设缓冲带, 可减少侵蚀总量 27.2%~32.9%, 减

少细沟侵蚀量 42.5%~48.6%。缓冲带可以明显的减少坡面细沟侵蚀量和总侵蚀量以及细沟侵蚀对坡面总侵蚀量的贡献率。

第 3 场降雨中, 坡面侵蚀活跃部位出现在坡面中部和坡面下部 2 个位置, 覆盖处理 I 中部斜坡长 5 m 处的秸秆缓冲带减少坡面侵蚀总量 33.6%, 减少细沟侵蚀量 40.8%; 而覆盖处理 II 中斜坡长 7 m 处的秸秆缓冲带减少坡面侵蚀总量 54.8%, 减少细沟侵蚀量 59.2%。可见, 2 种布设位置的缓冲带均可有效减少坡面侵蚀总量特别是细沟侵蚀量, 但在坡面细沟发育后期集中水流的作用下, 细沟侵蚀量急剧增大, 坡面中部的缓冲带并不能够有效地限制坡面下部的细沟发育, 而布设于坡面下部的缓冲带则可以取得更好的减蚀效果。

2.2 玉米秸秆覆盖缓冲带对坡面细沟形态的影响

2.2.1 细沟平面形态和细沟平均深度

玉米秸秆覆盖缓冲带可以通过对径流泥沙的物理拦截作用增加淤积量减少侵蚀, 因此, 分析坡面细沟的平面形态和雏形沟的沿程宽度深度变化等可以解释其拦截泥沙、减少侵蚀、改变坡面局部微地形的作用。

根据式(1)和式(2)计算细沟累积长度、细沟密度、细沟总面积、细沟割裂度(表 3)。连续降雨条件下的裸露处理中, 第 1 场降雨后细沟网络充分发育, 细沟累积长度和细沟密度增大。但根据细沟袭夺理论^[31], 随着坡面细沟网的发育, 径流的汇集使得细沟合并明显增多, 径流掏蚀作用造成的沟壁崩塌使细沟扩张进而合并其他细沟, 致使细沟累积长度减小。因此, 在裸土处理

的第 2 场和第 3 场降雨中，细沟累积长度不断减小。而在 2 个覆盖处理中秸秆缓冲带对布设处及其下方的细沟发育速度有限制，第 3 场降雨后的细沟累积长度反而较第 2 场降雨后略有上升。

3 场降雨后，秸秆覆盖缓冲带可以减少细沟总面积和细沟割裂度 23.0%~32.0% (表 3)。裸土处理中细沟总面积和细沟割裂度随降雨历时不断增大，其中第 2 场降雨后的细沟总面积较第 1 场降雨后增大了 58.0%，第 3 场降雨后的细沟总面积较第 2 场降雨后细沟总面积增大了 26.6%；覆盖处理 I 中第 2 场降雨后的细沟总面积较第 1 场降雨后增大了 30.2%，第 3 场降雨后的细沟总面积较第 2 场降雨后仅增大了 11.6%；而覆盖处理 II 下第 2 场降雨后的细沟总面积较第 1 场降雨后增大了 39.1%，第 3 场降雨后较第 2 场降雨后仅增大了 6.3%。因此，7 m 处的缓冲带具有更好地减小地面破碎程度的作用。

细沟平均深度的变化受犁底层深度和覆盖缓冲带的共同影响。第 1 场降雨后，锥形细沟深度很快达到了

20 cm，但到达犁底层深度后细沟纵向发育较慢，而此时其他细沟继续发育，最终坡面细沟平均深度变化范围为 13.5~16.9 cm；第 2 场降雨后，裸土处理中细沟平均深度超过 20 cm，到达犁底层深度，而 2 个覆盖处理的细沟平均深度均没有穿透耕作层到达犁底层，显示了秸秆覆盖缓冲带减少细沟深度的效果，秸秆覆盖缓冲带处理最终减小细沟平均深度 6.7%~10.5%；对比第 2、3 场降雨后的细沟平均深度可知，覆盖处理 I 的细沟平均深度增加了 21.0%，覆盖处理 II 的细沟平均深度增加了 15.6%，同样说明在细沟发育的后期，坡面下部 7 m 处的缓冲带具有更好的减小坡面细沟平均深度的作用。

2.2.2 锥形细沟沿程宽度和深度

对单位坡长内的细沟平面形态特征和细沟深度变化特征研究表明，玉米秸秆缓冲带可以减少坡面细沟平面密度和细沟侵蚀深度^[32]，然而针对于单条细沟的沿程宽度和深度变化的研究较少，因此，针对提前制作的锥形细沟，在每次降雨结束后测量其宽度和深度的沿程变化 (图 2)。

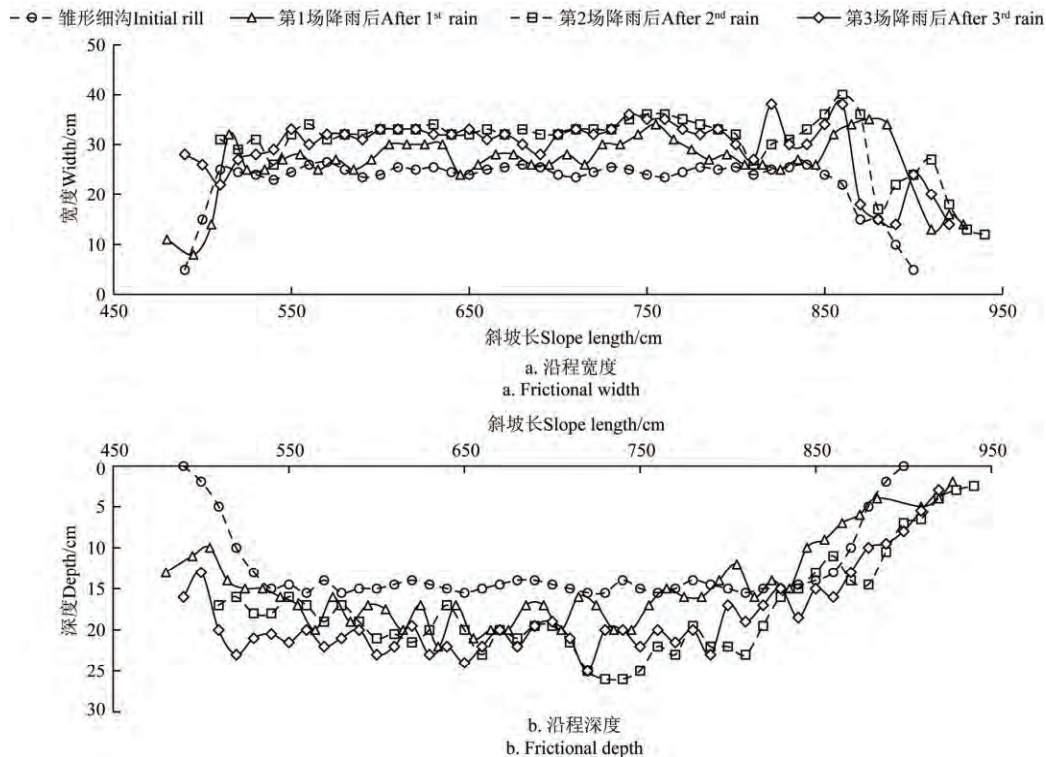


图 2 连续降雨条件下覆盖处理 II 锥形细沟沿程宽度和深度的变化

Fig.2 Frictional initial rill width and depth in mulching treatment II under successive rainfall condition

比较覆盖处理 II 中锥形细沟的沿程宽度变化 (图 2a) 可知，第 1 场降雨结束后，由于径流能量随着剥蚀、搬运和沉积过程的周期性变化，细沟的宽度沿沟长方向呈现周期性宽窄变化^[33]，试验条件下，细沟宽度值重复发生的长度约为 1.2 m，即径流在 1.2 m 内达到了相对平衡状态；第 2 场降雨后，细沟沿程宽度均有所增大，表明这一时期内，沟壁崩塌仍然是坡面上的主要侵蚀方式之一，但由于秸秆缓冲带对水流的阻挡和分配作用，细沟宽度沿沟长的变化趋势失去原有的周期性，细沟沿程宽度值基本稳定在 30 cm，这也反映出秸秆缓冲带对沟道的保护作用；第 3 场降雨后，细沟宽度基本保持不变。表

明这段时间内细沟的沟壁崩塌速率基本为 0，在秸秆缓冲带覆盖部位，细沟宽度由于泥沙淤积反而有所减小。

对覆盖处理 II 中锥形细沟沿程深度的连续监测结果表明，秸秆缓冲带可以通过泥沙淤积作用减小覆盖位置的沟道深度，保护覆盖部位及下方有限区域内的沟道 (图 2b)。由于跌坎链的发育特征^[34]及测量方法的限制，锥形细沟的沿程深度波动较大。第 1 场降雨后，沟道沿程深度均有增大，而在沟尾即斜坡长 8~9 m 处由于出水口的阻挡存在明显淤积；第 2 场降雨后，斜坡长 5.5~7 m 处侵蚀深度略有增加但基本维持不变，且锥形细沟的沿程深度波动较第 1 场降雨后明显变小，而斜坡长 7 m 以

下的侵蚀沟深度明显增大。可见斜坡长 5 m 处的秸秆缓冲带促使布设部位发生了泥沙淤积, 跌坎上下方的细沟深度差变小, 保护了 5~7 m 以内的侵蚀沟道, 但随着坡长增加, 径流的重力势能转化为动能, 径流侵蚀力再次增大, 斜坡长 7 m 以下的沟道受到严重侵蚀, 沟底下切作用强烈, 沟道深度继续增大; 第 3 场降雨时, 秸秆缓冲带布设在斜坡长 6.5~7.5 m 处, 因此, 斜坡长 5~6.5 m 处侵蚀深度增大, 但由于侵蚀深度已达犁底层, 土壤容重增大, 沟底的下切需要更大的径流能量, 因而侵蚀深度增加幅度较小。而斜坡长 6.5~9 m 处的侵蚀深度由于泥沙被拦截反而减小, 说明秸秆覆盖缓冲带可以促使泥沙淤积, 保护其布设部位下方有限长度内的沟道。

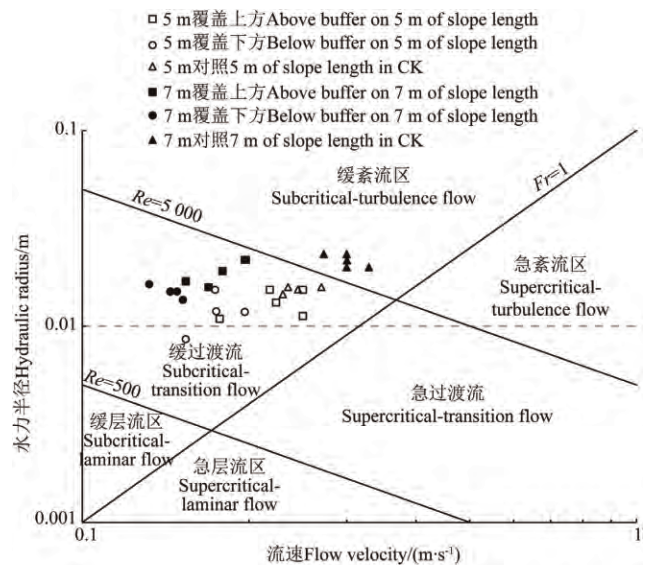
2.3 秸秆缓冲带对细沟水流流态和水动力学参数的影响

玉米秸秆缓冲带可以通过拦截径流减小径流能量来减少坡面侵蚀量, 根据式 (5)~式 (11) 计算分析秸秆缓冲带上下方细沟水流水动力学特征值, 进而解释秸秆缓冲带减少坡面侵蚀的水动力学机理。

按明渠水流理论, 水流流动形态可分为层流区、过渡区和紊流区, 水流处于不同流区, 其阻力规律不同。对于明渠水流而言, 当 $Re < 500$ 时, 水流处于层流区, 当 $500 < Re < 5000$ 时, 属于过渡流区范畴, 当 $Re > 5000$ 时为紊流区。流态是指水流是缓流还是急流, 一般明渠水流有 3 种流态, 即缓流、临界流和急流。按清水明流的判别标准, 可以认为当佛汝德数 $Fr > 1$ 时, 水流为急流, $Fr < 1$ 时为缓流, $Fr = 1$ 时, 水流为临界流, 因此, 细沟水流可分为 6 区流态, 分别为缓层流、缓过渡流, 缓紊流、急层流、急过渡流、急紊流。根据 Re 和 Fr 的计算公式可知, 当 Re 和 Fr 为常数时, 将其绘制在水力半径 R 和流速 V 的双对数坐标系中可以得到直线关系, 以 $Re=500$ 、 $Re=5000$ 和 $Fr=1$ 这三条直线为界限, 可以判别 6 区流态^[35], 进而得到秸秆缓冲带上下方细沟水流流态的分区 (图 3)。

除了 7 m 对照处理中的细沟水流流态处于紊流区外, 其他处理的细沟水流均处在过渡流状态, 而所有细沟水流均未达到急流状态。对比缓冲带上方和对照处理中的细沟水流流态可知, 没有缓冲带影响的情况下, 细沟水流流态应该由层流向紊流、由缓流向急流状态延伸, 而对比缓冲带下方和对照处理中的细沟水流流态可知, 秸

秆缓冲带的存在使细沟水流流态向相反方向 (紊流向层流、急流向缓流) 延伸 (图 3)。



注: Re 、 Fr 为雷诺系数、佛汝德数; CK 为裸土。
Note: Re and Fr are Reynolds number and Froude number; CK is bare land.

图 3 秸秆覆盖缓冲带上下方细沟水流流态分区
Fig.3 Rill flow state zoning above and below cornstalk mulching buffer

在覆盖试验处理的第 2 场降雨中, 斜坡长 5 m 处覆盖了秸秆缓冲带。与缓冲带上方相比, 缓冲带下方的径流流速、雷诺数、佛汝德数分别减小了 21.9%、29.6%、18.5%, 具有显著差异 (表 4), 这说明秸秆缓冲带覆盖能显著降低径流流速和径流紊动强度; 细沟水流沿细沟侵蚀槽流动时, 必然受到阻力的影响, 其阻力主要来自含沙水流中的沙粒本身对水流的阻碍作用、沟槽形态对水流的约束和细沟水流挟沙过程所造成的能量损失^[36], 通过秸秆缓冲带后, 细沟水流阻力系数增大了 43.3%, 径流的挟沙能力下降, 坡面侵蚀减少; 上方径流穿过秸秆缓冲带后径流剪切力, 单位水流功率, 径流断面单位能量分别减小了 13.6%、21.0%、9.5%, 这说明径流对土壤颗粒的剥蚀、搬运能力下降, 本应该消耗在剥蚀和搬运土壤颗粒的一部分径流能量消耗在了穿过秸秆缓冲带上, 使得坡面侵蚀量减少。秸秆缓冲带的存在显著的改变坡面水动力学特征, 这对于减少坡面侵蚀量有重要意义。

表 4 秸秆缓冲带上下方细沟水流水动力学特征参数
Table 4 Hydraulic and hydrodynamic character of rill flow above and below straw buffer

| 缓冲带位置 Cornstalk buffer position | 流速 Velocity/(cm·s ⁻¹) | 雷诺数 Reynolds number | 佛汝德数 Froude number | Darcy-weisbach 阻力系数 | 径流剪切力 Flow shear stress/Pa | 单位水流功率 Unit stream power/(m·s ⁻¹) | 断面单位能量 Unit section energy/cm |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|
| 5 m 对照 5 m in control treatment | 24.5b | 4019.2b | 0.56a | 7.39c | 54.81bc | 0.089ab | 2.24bc |
| 5 m 缓冲带上方 5 m above the buffer | 22.4b | 2151.6c | 0.54a | 7.81c | 49.04bc | 0.081bc | 2.01bc |
| 5 m 缓冲带下方 5 m below the buffer | 17.5cd | 1515.5d | 0.44b | 11.19bc | 42.39c | 0.064cd | 1.82c |
| 7 m 对照 7 m in control treatment | 30.0a | 6912.8a | 0.58a | 6.99c | 77.29a | 0.109a | 3.21a |
| 7 m 缓冲带上方 7 m above the buffer | 17.9c | 2505.6c | 0.36bc | 17.09ab | 68.09ab | 0.065cd | 2.67ab |
| 7 m 缓冲带下方 7 m below the buffer | 14.4d | 1557.1d | 0.33c | 20.92a | 53.48bc | 0.052d | 2.11bc |

注: 同一列中的不同字母表示 0.05 的差异性显著。Note: Different letters in the same column represent significant difference at 0.05 level.

在覆盖试验处理 II 的第 3 场降雨中, 斜坡长 7 m 处覆盖了秸秆缓冲带。与缓冲带上方相比, 秸秆缓冲带下方的径流流速、雷诺数、佛汝德数分别减小了 19.6%、37.9%、8.3%, 细沟水流阻力系数增大了 22.4%, 而水流剪切力、单位水流功率和断面单位能量分别减小 21.5%、20.0% 和 21.0%。斜坡长 7 m 处的秸秆缓冲带同样可以明显减小坡面径流流速, 降低径流紊动强度, 增加水流阻力系数, 削弱径流剥蚀和搬运土壤颗粒能力, 减少径流能量, 改变了坡面水动力学特征, 并最终达到减少坡面侵蚀量的目的。

3 讨论

为了保证各试验处理前期土壤水分状况的一致性, 在试验前进行了前期预降雨处理, 坡面土壤水分接近饱和, 坡面土壤质量含水率在 22.38%~24.17% 之间, 因此, 秸秆覆盖缓冲带对坡面径流的影响相对较小。但与裸露处理相比, 覆盖处理仍然在很大程度上增加了土壤入渗量, 减少了径流转化为侵蚀动力源的可能, 并最终通过减少细沟侵蚀量减少了坡面总侵蚀量。这与之前进行的关于切碎后的玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙影响的研究结果类似^[15]。此外, 在坡面细沟发育后期, 坡面中部和坡面下部的细沟侵蚀强度均比较剧烈, 坡面中部的缓冲带不能够有效地限制坡面下部的细沟发育, 在坡面下部布设秸秆缓冲带可以取得更好地减少侵蚀和约束细沟形态变化的效果。

裸露坡面上的细沟形态可以从侧面反映出坡面水流能量的聚集与耗散过程, 例如, 由于输沙动态平衡的存在, 细沟宽度会沿坡长方向出现 1.2 m 长的周期性的变化, 细沟沿程深度会由于跌坎链的发育情况出现较大波动。但秸秆覆盖缓冲带改变了细沟形态的这种规律性, 它不仅通过减少径流能量减少沟壁崩塌作用消除了细沟宽度的周期性变化, 还通过泥沙淤积, 保护布设位置的细沟沟道, 减小了细沟沿程深度的波动情况。

本文中的秸秆覆盖缓冲带属于等高缓冲带的一种延伸形式^[37], 能够减少坡面土壤侵蚀造成的泥沙、养分和杀虫剂流失或对环境的危害等。关于缓冲带减蚀效应的研究目前大多集中在植被缓冲带, 而本文的缓冲带以玉米秸秆作为试验材料, 将被农民废弃的玉米秸秆以整株的形式覆盖在坡耕地上, 形成玉米秸秆覆盖缓冲带。这样既可以减少坡面土壤侵蚀, 又实现了秸秆还田, 提高土壤有机质含量, 因而可在野外有条件的地方进行大面积使用。

缓冲带防治侵蚀的效果受地表坡度、缓冲带宽度、缓冲带间距等影响, 因此, 国内外学者也针对缓冲带布设宽度、间距及地表坡度等影响因素进行了研究^[9-11,38], 在不同地区的不同地形条件下设置了不同宽度和间距的缓冲带, 以减少坡面土壤侵蚀的危害。在黄土高原地区, 地表坡度较大, 细沟侵蚀严重, 在试验条件下的 20° 的坡度情况下, 5 m 的汇水坡长足以使细沟良好发育。因此, 在此类地形条件下, 根据细沟发育程度, 可在坡面上每隔 5~7 m 布设秸秆覆盖缓冲带, 削弱径流侵蚀能力, 进而达到减少坡面细沟侵蚀和坡面侵蚀的目的。

4 结论

本文通过室内人工模拟连续降雨试验, 在黄土高原典型高强度侵蚀性降雨条件和细沟发育活跃的典型坡度条件下, 研究了玉米秸秆覆盖缓冲带对坡面细沟侵蚀、细沟水流水动力学特征的影响, 具体结论如下:

1) 秸秆覆盖缓冲带明显增加了坡面土壤入渗量, 而坡面水文条件的改变对坡面侵蚀过程有明显影响。玉米秸秆缓冲带覆盖可以减少坡面侵蚀量 27.2%~54.8%, 减少细沟侵蚀量 40.8%~59.2%, 减小细沟侵蚀量对坡面总侵蚀量的贡献率, 在坡面细沟发育后期, 在坡面下部布设缓冲带可取得更好的减蚀效果。

2) 连续降雨条件下, 细沟累积长度和细沟密度由于细沟袭夺和细沟合并呈现先增大后减少的趋势, 而缓冲带改变了这一特点; 缓冲带减少细沟总面积和细沟割裂度 23.0%~32.0%, 减小细沟平均深度 6.7%~10.5%, 且在细沟发育后期, 坡面下部 7 m 处的秸秆覆盖缓冲带可以取得更好地减小细沟割裂度和细沟平均深度的效果。对单条细沟来说, 秸秆覆盖缓冲带不仅改变了细沟宽度沿坡长方向出现的 1.2 m 长周期性的变化规律, 还通过泥沙淤积, 保护布设位置的细沟沟道, 减小了细沟沿程深度的波动情况。

3) 试验条件下, 秸秆缓冲带可使本应向急紊流流态延伸的细沟水流向缓层流流态方向延伸。与缓冲带上方相比, 秸秆缓冲带下方的细沟水流流速显著减小 19.6%~21.9%, 雷诺数和佛汝德数分别减少了 29.6%~37.9% 和 8.3%~18.5%, 而通过秸秆缓冲带后, 细沟水流 Darcy-weisbach 阻力系数增加了 22.4%~43.3%, 水流剪切力、单位水流功率和断面单位能量分别减小 13.6%~21.5%、20.0~21.0% 和 9.5%~21.0%, 径流能量的降低最终减小了坡面细沟侵蚀量和坡面总侵蚀量。

4) 在试验坡度为 20° 的情况下, 5 m 的汇水坡长足以使细沟良好发育, 因此, 在与此类似的地形条件下, 可根据细沟发育程度在坡面上每隔 5~7 m 布设玉米秸秆覆盖缓冲带, 削弱径流侵蚀能力, 进而达到减少坡面细沟侵蚀和坡面侵蚀的目的。这样既可以减少坡面土壤侵蚀, 又实现了秸秆还田, 提高土壤有机质含量, 可在野外有条件的地方大面积使用。

[参 考 文 献]

- [1] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. *Catena*, 2010, 81(1): 77-85.
- [2] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 870-875. Wu Shufang, Wu Pute, Song Weixiu, et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effect on overland flow and sediment reduction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(7): 870-875. (in Chinese with English abstract)
- [3] 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3): 1-4. Gao Huanwen, Li Wenying, Li Hongwen. Conservation tillage technology with Chinese characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(3): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [4] 冉大川, 赵力毅, 张志萍, 等. 黄土高原不同尺度水保坡面措施减轻沟蚀作用定量研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(10): 1135-1141.

- Ran Dachuan, Zhao Liyi, Zhang Zhiping, et al. A quantitative study on the effect of soil and water conservation measures on slope rill erosion mitigation with different scale in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(10): 1135—1141. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郑明国, 蔡强国, 王彩峰, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面水土保持措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J]. *水利学报*, 2007, 38(1): 47—53.
- Zheng Mingguo, Cai Qiangguo, Wang Caifeng, et al. Effect of vegetation and other measures for soil and water conservation on runoff sediment relationship in watershed scale[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 47—53. (in Chinese with English abstract)
- [6] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(1/2): 21—36.
- [7] Hussein J, Yu B, Ghadiri H, et al. Prediction of surface flow hydrology and sediment retention upslope of a vetiver buffer strip[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 338(3/4): 261—272.
- [8] Ma Lan, Pan Chengzhong, Teng Yanguo, et al. The performance of grass filter strips in controlling high-concentration suspended sediment from overland flow under rainfall/non-rainfall conditions[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(13): 1523—1534.
- [9] Lambrechts T, Francois S, Lutts S, et al. Impact of plant growth and morphology and of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: Flume experiments and VFSMOD modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 800—810.
- [10] Blanco-Canqui H, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1670—1678.
- [11] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401—407.
- Zhu Bingbing, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 401—407. (in Chinese with English abstract)
- [12] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(2): 232—237.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(2): 232—237. (in Chinese with English abstract)
- [13] Montenegro A A A, Abrantes J R C B, De Lima J L M P, et al. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall[J]. *Catena*, 2013, 109: 139—149.
- [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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM)*, 2015, 46(8): 130—137. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张翼夫, 李洪文, 何进, 等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 118—124.
- Zhang Yifu, Li Hongwen, He Jin, et al. Effects of maize straw mulching on runoff and sediment process of slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(7): 118—124. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王彬, 郑粉莉, 安娟, 等. 激光衍射法与吸管法对东北黑土区土壤粒径分布测定的差异性研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(2): 134—139.
- Wang Bin, Zheng Fenli, An Juan, et al. Comparative study of particle size distribution by laser diffraction method and pipette method in black soil region of northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(2): 134—139. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
- [18] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 64—68.
- Li Zhanbin, Qin Baishun, Kang Wei, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(6): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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)
- [20] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I Velocity relationship[J]. *Transactions of ASAE*, 1984(27): 790—796
- [21] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5514—5521.
- Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. An experimental study on rill morphology at loess hillslope[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5514—5521. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 坡度对坡面细沟侵蚀的影响——基于三维激光扫描技术[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3): 1—5.
- Chen Junjie, Sun Liying, Liu Junti, et al. Effects of slope gradients on rill erosion: Study based on three-dimensional laser technology[J]. *Science of Soil and Water Conservation in China*, 2013, 11(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的讨论[J]. *水土保持通报*, 1989, 9(4): 41—47.
- Zheng Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1989, 9(4): 41—47. (in Chinese with English abstract)
- [24] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 植被覆盖下黄土凸型复合坡面水流特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 147—154.
- Wei Xia, Li Xungui, Li Zhanbin, et al. Flow characteristics of convex composite slopes of loess under vegetation cover[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(22): 147—154. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 182—189.
- Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(15): 182—189. (in Chinese with English abstract)
- [26] An Juan, Zheng Fenli, Lu Jia, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions[J]. *Soil Science*, 2012, 177(8): 517—526.
- [27] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. Laboratory study of rill hydraulics. II. shear stress relationships[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(3): 797—804.
- [28] Yang Z T. Incipient motion and sediment transport[J]. *Transactions of the ASAE*, 1973, 99(10): 9198—9314.
- [29] Moor L P, Burch G L. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(8): 1350—1360.
- [30] 郑粉莉, 肖培青. 黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 202—204.
- [31] Gessesse G D, Fuchs H, Mansberger R, et al. Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry[J]. *The Photogrammetric Record*, 2010, 25(131): 299—318.
- [32] 覃超, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 玉米秸秆缓冲带防治黄土坡面细沟侵蚀的效果[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1): 35—42.

- Qin Chao, Zheng Fenli, Xu Ximeng, et al. Effects of maize straw buffer in preventing rill erosion on loess slope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 35–42. (in Chinese with English abstract)
- [33] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. *水利学报*, 2000, 31(11): 49–54. Lei Tingwu, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(11): 49–54. (in Chinese with English abstract)
- [34] 和继军, 吕焯, 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 characteristic and its runoff and sediment yield process[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(4): 398–405. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 825–834. Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 825–834. (in Chinese with English abstract)
- [36] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J]. *泥沙研究*, 2002(4): 69–74. Xiao Peiqing, Zheng Fenli. Effects of up-slope runoff and sediment on rill hydraulic parameters[J]. *Journal of Sediment Research*, 2002(4): 69–74. (in Chinese with English abstract)
- [37] 秦明周. 美国土地利用的生物环境保护工程措施: 缓冲带[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 119–121. Qin Mingzhou. Biological environment measures of United States land uses: Buffer strips[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 119–121. (in Chinese with English abstract)
- [38] 辛雷勇. 砒砂岩区坡面植被缓冲带布设技术[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. Xin Leyong. Technology of Slope Vegetation Buffer Strip Placed in Soft Rock Area[J]. Huhehot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)

Impacts of cornstalk mulching buffer strip on rill erosion and its hydrodynamic character

Xu Ximeng¹, Zheng Fenli^{1,2*}, Wu Hongyan¹, Qin Chao¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the 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)

Abstract: Cornstalk mulching buffer strip is an effective soil and water conservation practice on slope. To enlarge our knowledge about the effects and hydrodynamic mechanism of cornstalk buffer strip reducing soil erosion on loessial hillslope, this paper studied the impact of different cornstalk buffer strip position (5 and 7 m of slope length) on slope erosion process and its hydrodynamic characteristics under the typical high intensity erosive rainfall (100 mm/h) and the slope gradient that most rills happened (20°). Successive rainfall simulation experiments were carried out at rainfall simulation laboratory of the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, from April to September in 2014. A slope adjustable pan (10 m long, 3 m wide, and 0.5 m deep) and a down sprinkler rainfall simulator system were included in the experiments. Loessial soil collected from 0 to 20 cm in the Ap horizon of a well-drained site in Ansai, Shaanxi Province, was packed according to natural soil structure on the Loess Plateau. Cornstalks collected in Yangling after harvest were settled on the different hillslope position based on rill developmental stage. 3 treatments including 1 control treatment and 2 mulching treatments were designed, and 3 successive 30-min rains were conducted in each treatment. The 1st rain was used to form rills on the hillslope with no buffer strip; cornstalk buffer strip was settled on the 5 m of slope length in both mulching treatments during the 2nd rain; while it was settled on the 5 and 7 m of slope length in mulching treatment I and II, respectively. Runoff and sediment samples were collected during successive rainfalls and rill morphology was measured after each rain. Rill flow hydraulic characters such as Reynold number, Froude number, Darcy-weisbach resistance coefficient, shear stress, unit power and unit energy of cross section were also calculated based on the measurement of runoff velocity and depth during the rains. The results showed that compared with the control, cornstalk buffer strip reduced total sediment yield and rill erosion amount by 27.2%-54.8% and 40.8%-59.2% respectively, and the contribution of rill erosion to total sediment yield was also reduced. In the aspect of rill morphology, cornstalk buffer strip reduced rill total surface area and rill average depth by 23.0%-32.0% and 6.7%-10.5%, respectively. At the late development stage of rills, buffer strip on the 7 m of slope length resulted in more sediment reduction and better rill morphology control effects. Studies on the individual rill showed that rill width appeared in a similar distribution every 1.2 m along slope length, which was shown after buffer strip was laid on the slope. Moreover, buffer strip also reduced the rill depth by accelerating the deposition process of sediment from upslope and protected the hillslope surface and rills below the buffer strip. Hydrodynamic analysis results showed that rill flow state extended from turbulence supercritical flow to laminar subcritical flow as a result of buffer strip. Compared with the rill flow above the cornstalk buffer, rill flow velocity was significantly decreased by 19.6%-21.9%, Reynold number and Froude number was decreased by 29.6%-37.9% and 8.3%-18.5% respectively, while Darcy-weisbach resistance coefficient was increased by 22.4%-43.3%. After rill flow going through the cornstalk buffer strip, shear stress, unit power and unit energy of cross section was reduced by 13.6%-21.5%, 20.0-21.0% and 9.5%-21.0% respectively, and the reduction of flow energy finally reduced the total sediment yield on hillslope. It can be drawn that cornstalk buffer strip can be settled on the hillslope surface every 5-7 m to decrease the runoff erosivity and finally decrease the rill erosion amount and total sediment yield, which can provide the valuable information for the settlement of soil conservation measures in similar terrain conditions.

Keywords: precipitation; erosion; hydrodynamics; cornstalk mulching buffer strip; rills; morphology