

# 沟蚀发育的黄土坡面上秸秆覆盖防蚀效果研究\*

徐锡蒙<sup>1</sup> 郑粉莉<sup>1,2</sup> 覃超<sup>1</sup> 吴红艳<sup>1</sup>

(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, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为评价玉米秸秆这一廉价资源的防蚀效果, 利用人工模拟降雨试验, 研究在黄土高原典型高强度侵蚀性降雨条件下, 不同玉米秸秆覆盖方式(沟头缓冲带覆盖、沟内填充覆盖)及其组合对沟蚀发育黄土坡面侵蚀的防治效果。结果表明, 对于有细沟和浅沟发育的黄土坡面, 不同方式秸秆覆盖可减少坡面侵蚀量 8.3% ~ 46.2%, 降低径流含沙浓度 19.1% ~ 49.6%。其中浅沟沟头覆盖 + 浅沟侵蚀带沟道全覆盖(H + G)和浅沟沟头覆盖 + 浅沟侵蚀带主沟道覆盖 + 细沟沟头覆盖(H + MG + RH)2 个处理的防蚀效果最佳, 二者分别减少坡面侵蚀量 45.0% 和 46.2%。秸秆覆盖通过改变坡面径流与侵蚀产沙量的关系而非减少径流量来减少坡面侵蚀量。不同方式的秸秆覆盖均可降低径流流速、减弱径流挟沙能力以及径流侵蚀力, 进而减少坡面侵蚀量, 其中, 浅沟沟头秸秆缓冲带覆盖和浅沟沟槽内秸秆填充覆盖均可减小流速 42.6% 以上。比较 2 种覆盖方式, 沟头缓冲带覆盖较沟内填充覆盖在减少侵蚀方面更有效。因此, 在沟蚀发育的黄土坡面上, 用玉米秸秆缓冲带覆盖侵蚀活跃的沟头部位可达到最优的防蚀效果。

**关键词:** 玉米秸秆 覆盖方式 沟蚀 黄土坡面 人工模拟降雨

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0130-08

## Erosion Control Effects of Cornstalk Mulching on Loess Hillslope with Gully

Xu Ximeng<sup>1</sup> Zheng Fenli<sup>1,2</sup> Qin Chao<sup>1</sup> Wu Hongyan<sup>1</sup>

(1. 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

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Active-stage gully erosion processes can result in steep rise of sediment yield, thus seeking effective ways has important implications for the prevention of slope gully erosion. To quantitatively evaluate the cornstalk mulching effects on controlling soil erosion on loess hillslope with gully, a series of artificial simulated rainfall experiments were conducted to study the effects of different combinations of cornstalk mulching positions (one was whole plant buffer mulching on the head of the gully and the other was filling the gully with clipped short cornstalk) on the gully erosion on loess hillslope under the typical high intensity erosive rainfall (on the Loess Plateau) condition. The results showed that the runoff amount was reduced by 7.2% ~ 13.8%, while the sediment yield and the average runoff sediment concentration were reduced by 8.3% ~ 46.2% and 19.1% ~ 49.6%, respectively. Treatment H + G (ephemeral gully head + all gully covered) and H + MG + RH (ephemeral gully head + main gully + rill head covered) got the best effect with reductions of 45.0% and 46.2% in reducing slope sediment yield, respectively. It was obvious that cornstalk mulching reduced sediment yield by changing the runoff-

收稿日期: 2014-10-27 修回日期: 2015-01-13

\* 国家自然科学基金资助项目(41271299)和水利部公益性行业科研专项资助项目(201201083)

作者简介: 徐锡蒙, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究, E-mail: xuxm@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 郑粉莉, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和土壤侵蚀环境效应评价研究, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

sediment relationship instead of reducing the runoff amount. The whole plant buffer mulching on the gully head was more effective between two mulching positions. Cornstalk mulching on different positions can reduce the channel runoff velocity, sediment transport capacity as well as runoff erosivity, which was meaningful for reducing soil erosion. For example, cornstalk buffer mulching on gully head and filling gully can both reduce the runoff velocity more than 42.6%. As a result, once gullies appeared on the loess hillslope, cornstalk mulching on active-stage gully head would be the best way to control gully erosion. Much better effects can be exhibited when gully itself was mulched with clipped short cornstalk at the same time.

**Key words:** Cornstalk Mulching position Gully erosion Loess hillslope Simulated rainfall

## 引言

沟蚀、尤其是处于发育活跃期的坡面沟蚀过程对流域的侵蚀产沙有重要贡献,其发生发展过程对现代坡面地貌发育及演化过程也具有重要的影响<sup>[1-2]</sup>。坡面水蚀从面蚀进入沟蚀过程后,径流深度、流速及侵蚀力均有很大增加,进而引起侵蚀量急剧增加<sup>[3-5]</sup>。野外调查与室内试验结果表明,坡面沟蚀可使坡面侵蚀产沙量增加几倍至几十倍,其侵蚀量可占坡面总侵蚀量的50%~70%<sup>[6]</sup>。随着坡面沟蚀的形成与发育,坡面水沙关系也会发生变化<sup>[7-8]</sup>,而坡面水土保持措施则可以通过改变坡面水沙关系减少土壤侵蚀量<sup>[9-12]</sup>。因此,开展坡面水土保持措施对黄土坡面沟蚀的防治效果研究具有重要意义。

近年来,国内外学者针对秸秆覆盖措施防治坡面侵蚀的效果进行了大量研究<sup>[13-20]</sup>。但目前关于秸秆覆盖措施防治土壤侵蚀方面的研究多以小麦、大豆等谷物秸秆为研究材料,覆盖方式多为坡面全部覆盖进而研究秸秆覆盖减少坡面溅蚀量、细沟侵蚀量和细沟间侵蚀量的效果;而用玉米秸秆覆盖防治沟蚀发育的坡面侵蚀研究鲜见报导。玉米是黄土高原的主要作物之一<sup>[21]</sup>,玉米秸秆资源丰富廉价却没有得到充分利用,很多甚至被直接焚烧,造成环境污染。因此,如何利用玉米秸秆资源防治坡面沟蚀发育,评价其防蚀效果具有重要意义。本文基于黄土高原典型高强度侵蚀性降雨事件和坡面沟蚀发育的代表性坡度,设计模拟降雨试验,分析不同秸秆覆盖方式对沟蚀发育的黄土坡面侵蚀的防治效果,以为黄土高原坡面沟蚀防治提供科学依据和技术支持。

## 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,选用下喷式降雨系

统,降雨高度18 m,可保证所有降雨雨滴达到终点速度,降雨均匀度大于80%,可最大程度地模拟天然降雨的雨滴直径与雨滴分布情况<sup>[22]</sup>。供试土槽为10 m(长)×3 m(宽)×0.5 m(深)的固定式液压升降钢槽,钢槽底部每1 m长排列4个孔径为2 cm的排水孔以保证降雨试验过程中排水良好,土槽下端设集流装置,用来收集径流泥沙样品。供试土壤为黄土高原丘陵沟壑区安塞县的黄绵土,其颗粒组成为:砂粒(大于50 μm)占28.3%,粉砂粒(2~50 μm)占58.1%,粘粒(小于2 μm)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两层,分别进行采集;用重铬酸钾-外加热法测定有机质质量比为5.9 g/kg。

试验选用杨凌常见的自然风干玉米秸秆进行覆盖,覆盖方式分为两类,一种是沟内填充覆盖,将整株玉米秸秆截成约5~10 cm小段(模拟机器收割)填充到沟内;一种是沟头秸秆缓冲带覆盖,先将要覆盖区域下方的沟道填平,再将整株的风干玉米秸秆(模拟人工收割)覆盖在坡面上,覆盖厚度为一株玉米秸秆的直径,约5 cm。

### 1.2 试验设计

根据黄土高原短历时、高强度侵蚀性降雨标准( $I_5 = 1.52 \text{ mm/min}$ )<sup>[23]</sup>,设计试验降雨强度为1.67 mm/min(100 mm/h),单次降雨历时30 min,根据黄土坡面侵蚀沟发育的典型坡度,设计坡度为20°。

根据野外浅沟发育的地形特征以及黄土区浅沟发育过程的特点<sup>[24-25]</sup>,在斜坡长5~8 m的坡面中心处以1:10的比例(室内模拟试验坡面尺寸:野外实际坡面尺寸)构建浅沟雏形沟。沟宽30 cm,沟底与两侧沟坡高差10 cm(图1a)。上方5 m的坡面作为下方坡面的汇水坡长,模拟浅沟侵蚀带上方的片蚀与细沟侵蚀带,而坡面雏形沟所在的位置则模拟浅沟侵蚀带,与野外梁坡上的片蚀-细沟-浅沟侵蚀的垂直分带性吻合<sup>[6,24-25]</sup>。随后进行3场次雨强为

1.67 mm/min 的连续降雨,每场降雨试验间隔 24 h,形成沟蚀良好发育的坡面。此外,前期降雨结束后对土壤质量含水率进行了定点测量,试验前坡面土壤含水率在 22.4% ~ 24.1% 之间。

随机选取试验处理进行各种组合的秸秆覆盖布设。基于坡面沟道发育情况以及野外调查结果,结合前人研究成果<sup>[26]</sup>,用整株玉米秸秆覆盖保护侵蚀沟沟头降低溯源侵蚀强度,用截断的玉米秸秆段填充覆盖侵蚀沟沟道减缓沟壁扩张和沟底下切速率。鉴于前期试验的重复性良好以及试验工作量的庞大,每个试验处理设置 2 个重复,对所有试验数据取平均值并计算标准偏差(SD)。具体试验设计列于表 1,试验处理的秸秆覆盖方式见图 1。

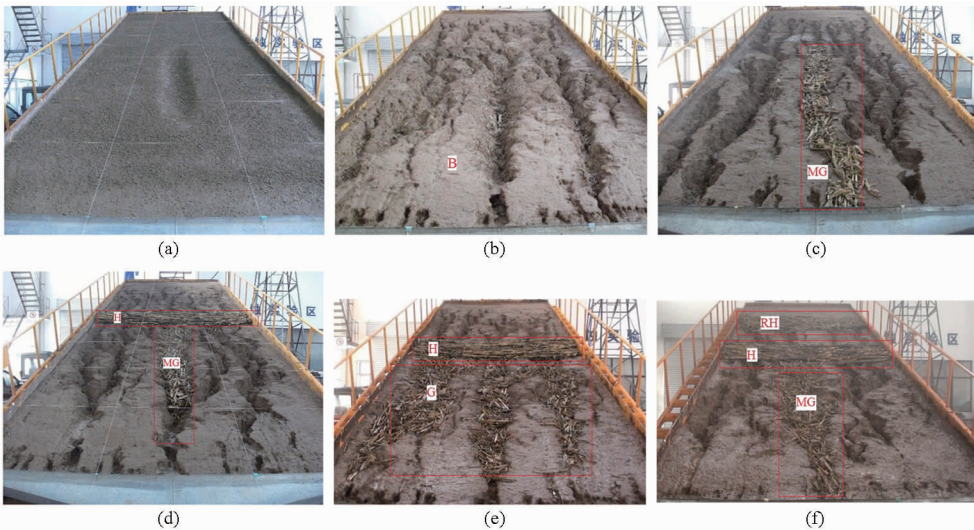


图 1 试验处理

Fig. 1 Experimental treatments

(a) 锥形沟 (b) 处理 B (c) 处理 MG (d) 处理 H+MG (e) 处理 H+G (f) 处理 H+MG+RH

### 1.3 试验步骤

为了保证所有试验土壤性状的相同,对试验土壤采取不过筛不研磨处理,尽量保持土壤原有结构免遭破坏。为使每次试验下垫面条件相似,每次试验结束后,重新按照设计的土层厚度和容重分层填充土槽。

试验土槽填土时,首先用纱布填充试验土槽底部的排水孔,随后填入 10 cm 厚天然细沙作为透水层,保障试验过程中试验土槽排水良好;然后在细沙层之上覆盖纱布,装填试验用土。填装容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup> 的黄绵土 10 cm 以模拟犁底层;犁底层之上填装容重为 1.10 g/cm<sup>3</sup> 的黄绵土 20 cm 以模拟耕层土壤。为保证试验土槽装土的均匀性,每 5 cm 填装一层,每填完一层后,用齿耙将土层表面耙松,再填装下一层土壤,以保证两个土层能够很好地接触。在填土时将试验土槽的四周边壁压实,以尽可能减小边界效应的影响。

表 1 试验设计

Tab. 1 Experimental design

试验处理	玉米秸秆覆盖方式	覆盖量/ (kg·m <sup>-2</sup> )	覆盖面 积/m <sup>2</sup>
B	裸露无覆盖	0	0
MG	浅沟侵蚀带主沟道覆盖	0.15	1.69
H+MG	浅沟沟头覆盖+浅沟 侵蚀带主沟道覆盖	0.25	4.68
H+G	浅沟沟头覆盖+浅沟 侵蚀带沟道全覆盖	0.31	9.92
H+MG+RH	浅沟沟头覆盖+浅沟 侵蚀带主沟道覆盖+ 细沟沟头覆盖	0.29	7.51

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样,待产流水平稳定后每隔 2 min 采集径流样。降雨过程中用高锰酸钾染色法测量侵蚀沟内水流流速,考虑到使用染色剂示踪法测定的径流流速为坡面优势流流速,用实测流速乘以修正系数 0.75 作为水流断面平均流速<sup>[27]</sup>。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℃ 干燥箱,干燥后称量。

## 2 结果与分析

### 2.1 前期降雨形成的坡面侵蚀沟发育情况

在经过相同控制条件下的 3 场连续降雨试验后,在斜坡长 1 ~ 1.5 m 的区域内形成细沟沟头,坡面上部呈现出明显的细沟网形态,形成 5 ~ 7 条径流流路;在斜坡长 4 ~ 5 m 处有明显的垂直比降,形成浅沟下切沟头;在坡面下部浅沟侵蚀带形成发育良好的侵蚀沟道。此时,锥形沟不断发育成为坡面浅

沟侵蚀带的主沟道,坡面下部两侧也发育 2 条汇水集中的侵蚀沟道,3 条径流流路在坡面上形成 3 个微型小流域(图 1)。

地面割裂度是研究区沟道面积占研究区总面积的百分数<sup>[28]</sup>,在文中指试验土槽沟蚀发育面积占试验土槽总面积的百分数,能很好地反映沟蚀对地面

的切割程度。经过 3 场连续降雨后,地面割裂度的平均值为  $(26.0 \pm 1.2)\%$ ,侵蚀深度的平均值为  $(15.8 \pm 0.8)$  cm,坡面沟蚀发育特征值均具有良好的重复性,其变异系数在 0.02 ~ 0.17 之间(表 2),保证了试验前地表侵蚀状况的一致性。

表 2 试验前坡面沟蚀发育情况

Tab. 2 Status of gully development before experiments

试验场次	地面割裂度/%	侵蚀深度/cm	坡上部细沟网		浅沟侵蚀带主侵蚀沟道		浅沟侵蚀带侧侵蚀沟道	
			宽/cm	深/cm	宽/cm	深/cm	宽/cm	深/cm
I	27.5	15.7	18.1	11.8	40.1	21.2	25.7	17.0
II	26.4	16.6	16.2	11.7	35.8	24.6	18.5	17.6
III	26.2	16.6	15.5	11.8	41.6	23.5	19.9	17.4
IV	25.3	14.9	14.8	11.2	40.1	20.3	25.9	17.1
V	24.4	15.1	14.9	11.2	41.5	20.6	19.1	16.8
平均值 ± 标准差	26.0 ± 1.2	15.8 ± 0.8	15.9 ± 1.4	11.5 ± 0.3	39.8 ± 2.4	22.0 ± 1.9	21.8 ± 3.7	17.2 ± 0.3
变异系数	0.05	0.05	0.08	0.03	0.06	0.09	0.17	0.02

注:试验场次 I ~ V 分别对应图 1b ~ 1f 所示的 5 个试验处理秸秆覆盖前的坡面沟蚀状况。

## 2.2 不同秸秆覆盖方式及组合对坡面径流量和坡面侵蚀量的影响

在沟蚀发育的黄土坡面上,各试验处理的秸秆覆盖都能有效减少坡面侵蚀量,而对坡面径流量的影响程度较小(表 3)。浅沟侵蚀带主沟道覆盖(MG)处理与裸露无覆盖(B)处理相比,坡面侵蚀量减少了 8.3%。浅沟沟头覆盖 + 浅沟侵蚀带主沟道覆盖(H + MG)与裸露无覆盖(B)处理相比,坡面侵蚀量减少 15.2%,其防蚀效果优于浅沟侵蚀带主沟道覆盖(MG)处理。对于浅沟沟头覆盖 + 浅沟侵蚀带沟道全覆盖(H + G)处理与浅沟沟头覆盖 + 浅沟侵蚀带主沟道覆盖 + 细沟沟头覆盖(H + MG + RH)处理,坡面侵蚀量分别减少 45.0% 和 46.2%,防治侵蚀的效果更加显著。

径流含沙质量浓度即径流含沙量是指单位体积

径流(浑水)中所含的干沙质量,能够反映一段时间内坡面径流搬运侵蚀泥沙的能力。比较各试验处理的径流含沙质量浓度,发现在浅沟主沟道内填充秸秆可使径流含沙质量浓度减少 19.1%;在浅沟下切沟头部位增加一条 1 m 宽的秸秆缓冲带,可使径流平均含沙质量浓度减少 35.7%;而在此基础上再增加一条细沟沟头的秸秆缓冲带,或者对浅沟侵蚀带的沟道全部覆盖,则可以减少径流平均含沙质量浓度 49.2% ~ 49.6%。

以上分析表明,在沟蚀发育的黄土坡面上,不同试验处理的秸秆覆盖对总径流量影响较小,而对减少坡面侵蚀量和径流含沙浓度均有一定效果,其中,防蚀效果以 H + MG + RH 和 H + G 处理最好,即覆盖量较大的处理减少侵蚀量的效果明显,这与前人的研究结果一致<sup>[13,16,29]</sup>。

表 3 不同试验处理的坡面径流量、坡面侵蚀量和径流含沙质量浓度

Tab. 3 Runoff amount, sediment yield and sediment concentration under different treatments

试验处理	径流量/L	径流量减少率/%	侵蚀量/kg	侵蚀量减少率/%	径流平均含沙质量浓度/(kg·m <sup>-3</sup> )	径流含沙质量浓度减少率/%
B	1 471.7 ± 82.5		328.5 ± 29.8		269.2 ± 24.9	
MG	1 366.2 ± 38.9	7.2	301.2 ± 18.4	8.3	217.9 ± 15.6	19.1
H + MG	1 355.0 ± 56.8	8.5	278.7 ± 16.7	15.1	173.1 ± 19.3	35.7
H + G	1 279.7 ± 32.6	14.2	180.5 ± 12.4	45.0	136.9 ± 10.7	49.2
H + MG + RH	1 294.4 ± 64.1	13.8	176.6 ± 9.8	46.2	135.7 ± 13.8	49.6

## 2.3 不同秸秆覆盖方式及组合对坡面径流和侵蚀过程的影响

### 2.3.1 不同秸秆覆盖方式及组合对坡面径流过程的影响

各试验处理坡面径流量随着降雨历时的增加快

速上升(图 2)。对于 B、MG、H + MG 处理,降雨历时 5 min 后,坡面径流量基本达到稳定值 1.6 mm/min,随后呈较小幅度的波动现象。而对于 H + G 和 H + MG + RH 处理,坡面径流量对降雨历时的响应相对缓慢,在 5 min 时,坡面径流量为 1.4 mm/min,随后

缓慢上升,在 10 min 后接近  $1.6 \text{ mm}/\text{min}$ ,且之后一直稳定在该值附近。虽然各试验处理的径流过程有所差异,但径流总量差异并不明显,B 处理坡面径流量略高于其他各试验处理,但产流过程波动大,而其他秸秆覆盖处理产流过程相对稳定,体现出秸秆覆盖在调节径流方面的作用。对于仅在浅沟侵蚀带主沟道覆盖的 MG 处理,其径流过程与 B 处理最相似;H + MG 处理中在浅沟沟头覆盖的秸秆缓冲带对上方汇水有拦截和重新分配作用,因而在径流过程上显得更为平稳;H + G、H + G + RH 处理的坡面径流经过 2 次拦截和重新分配作用,径流量少且径流过程平稳。

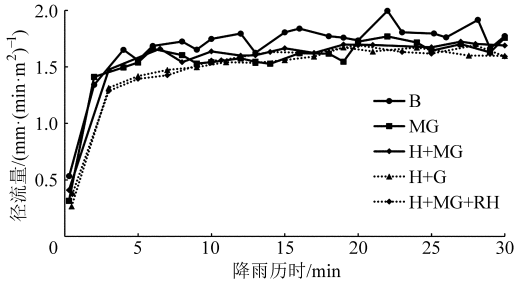


图2 不同试验处理的坡面径流过程

Fig. 2 Hillslope runoff processes in different treatments

### 2.3.2 不同秸秆覆盖方式及组合对坡面侵蚀产沙过程的影响

在沟蚀发育的黄土坡面上,不同方式覆盖玉米秸秆对减小坡面侵蚀均有较明显的效果(图3)。B 处理坡面侵蚀量在初始的 5 min 内快速增大,随后缓慢上升且上升过程伴随着由于侵蚀沟发育而引起的较大波动;MG 处理的侵蚀产沙量在降雨开始的 6 min 内迅速增大到  $300 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ,但在随后的 13 min 内基本保持稳定,在降雨的最后 10 min 才开始上升,其侵蚀产沙过程与 B 处理最为相似,其波动性也比较大。这主要是因为秸秆只覆盖了浅沟侵蚀带的主沟道,坡面其他部位的沟蚀发育及侵蚀产沙过程不受影响;对于 H + MG 处理,在浅沟沟头处增加一条秸秆缓冲带后坡面侵蚀产沙过程则显得更为平稳,在降雨开始的 3 min 内,侵蚀产沙量增长速度较快,随后便以稳定的增长速率上升,并最终在 30 min 后达到  $400 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。对于 H + G 与 H + MG + RH 处理,坡面侵蚀产沙过程从开始产流后便保持很小的增长速率呈缓慢上升,直到 30 min 降雨结束时,侵蚀产沙量为  $200 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ,低于对照 B 处理 5 min 时的侵蚀产沙量( $300 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ),与 MG 处理在 6 min 时的侵蚀产沙量基本相同。不同试验处理下坡面侵蚀产沙过程具有明显的差异,而其中 H + G 与 H + MG + RH 试验处理的秸秆覆盖防蚀效果最明显。

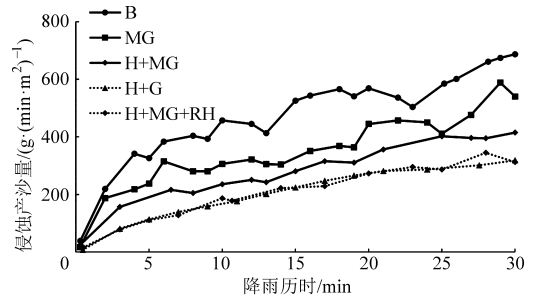


图3 不同试验处理的坡面产沙过程

Fig. 3 Hillslope sediment yield processes in different treatments

### 2.3.3 不同秸秆覆盖方式及组合对坡面径流与侵蚀产沙量关系的影响

各试验处理坡面径流侵蚀产沙量关系(图4)表明,当径流量增大时,侵蚀产沙量急剧增大,秸秆覆盖可明显改变坡面径流与侵蚀产沙量的关系,进而减少坡面侵蚀量。与对照 B 处理相比,各秸秆覆盖处理的坡面径流量减少了 7.2% ~ 13.8%,而侵蚀量减少了 8.3% ~ 46.2%,反映出秸秆覆盖在一定程度上可以减少坡面径流量,但这并不是减少坡面侵蚀量的根本原因,而是通过改变坡面径流与侵蚀产沙量的关系来减少侵蚀量。这也说明玉米秸秆覆盖类似于坡面径流调控措施,能够改变坡面的水沙输出过程<sup>[30]</sup>。

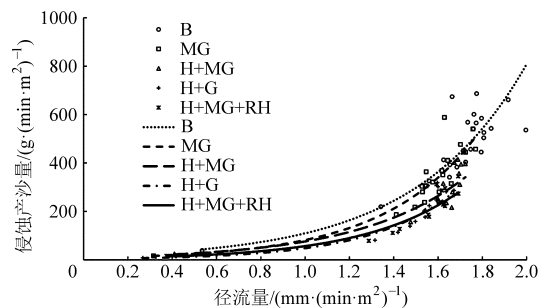


图4 不同试验处理中径流和侵蚀产沙量关系

Fig. 4 Relationship between runoff and sediment yield in different treatments

## 3 讨论

由于在各试验处理正式降雨之前,都进行了相同条件的前期降雨,使得坡面土壤含水率较为一致,处于 22.4% ~ 24.1% 之间,所以各试验处理的坡面径流过程在经历了快速上升后便很快趋于稳定,秸秆覆盖减少径流的效果不明显。

由于秸秆覆盖方式的不同,各秸秆覆盖处理减少侵蚀量的原因也不尽相同。MG 处理与对照 B 处理相比,虽然浅沟侵蚀带主沟道内的秸秆覆盖抑制了沟壁扩张和沟底下切作用,但坡面两侧的沟道继续发育,使坡面侵蚀量不断增加,因而坡面侵蚀量的



减少幅度较小。H + MG 处理切断了浅沟沟头秸秆缓冲带上下方的沟道连接,削弱了上方汇水能量并对径流进行了重分配,因而减少了坡面侵蚀量,且防蚀效果优于 MG 处理。H + G 处理中,径流在经过浅沟沟头秸秆缓冲带的阻拦和重新分配后,又被下方各沟道内的填充秸秆阻拦,径流侵蚀能量被削弱,导致泥沙沉积,从而使坡面侵蚀量显著减小。对于 H + MG + RH 处理,细沟沟头缓冲带和浅沟沟头缓冲带有效地削弱径流能量,使泥沙沉积,导致坡面径流重新分配,有效地阻止了股流的强烈冲刷<sup>[5-6,31]</sup>,因而减少了侵蚀产沙量。

沟头覆盖秸秆缓冲带能有效减少坡面侵蚀产沙量,主要有以下 3 方面原因:①沟头覆盖秸秆形成的缓冲带切断了其上、下方的水沙传递关系,通过对其上方坡面径流的拦截,降低了径流流速(表 4),其中,在细沟沟头缓冲带下方(斜坡长 3 m 处)径流流速减小 20.4%,而在浅沟沟头处(斜坡长 5 m 处)和下方(斜坡长 7 m 处)径流流速减小 35.8% ~ 46.1%,随着径流流速减小,径流侵蚀能量也减小,缓冲带下方坡面径流的侵蚀和侧蚀能力减弱,最终导致坡面侵蚀量减少,其他秸秆覆盖处理<sup>[29]</sup>以及植被缓冲带措施<sup>[27,31]</sup>也具有相同的降低径流流速的效果。②秸秆缓冲带有拦截泥沙的作用,缓冲带中的空隙可以被上方来水中的泥沙填充;此外,由泥沙运动学理论可知,坡面水流挟沙能力与水流流速的立方成正比<sup>[32]</sup>,流速的减小(表 4)意味着径流挟沙能力下降,泥沙沉积在缓冲带的上部,造成缓冲带上方的地形变缓(图 5),进一步减弱了径流侵蚀能力,从而导致坡面侵蚀量减少。③沟头覆盖秸秆形成的缓冲带对沟头形成了机械保护作用<sup>[26]</sup>,抑制了溯源侵蚀,进而减少了沟头溯源侵蚀引起的侵蚀产沙量。

表 4 秸秆缓冲带对沟道径流流速影响

Tab. 4 Effects of cornstalk buffer on channel runoff velocity

监测 坡长 位置/m	裸露处理	H + MG 处理		H + MG + RH 处理	
	B 流速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	流速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	流速减小 百分数/%	流速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	流速减小 百分数/%
3	17.8 ± 3.4	15.9 ± 0.7	10.6	14.1 ± 1.5	20.4
5	20.8 ± 1.3	12.8 ± 3.1	38.6	13.4 ± 3.7	35.8
7	30.2 ± 4.1	16.3 ± 3.3	46.1	16.9 ± 2.8	44.2
9	32.7 ± 5.6	28.7 ± 0.5	12.1	29.1 ± 3.2	11.0

沟内填充玉米秸秆主要通过两方面作用减少坡面侵蚀量。在 H + G 试验处理,选取了 2 条位于坡长 7 m 处、宽度和深度类似的长度约 1 m 的沟道,其中一条在沟内填充了秸秆,而另一条则为裸露处理,发现没有秸秆覆盖处理的沟内水流平均流速为



图 5 沟头覆盖秸秆缓冲带上方发生的泥沙淤积

Fig. 5 Occurrence of sediment deposition above buffer strip at gully head

17.2 cm/s, 而有秸秆覆盖的沟内平均流速为 9.8 cm/s,即秸秆填充覆盖使沟内水流流速减小了 42.6%。秸秆填充覆盖降低了沟内水流流速,削弱径流动能,抑制了水流的下切侵蚀和侧蚀能力,减缓了沟蚀的发生发展,使坡面侵蚀量减少;同时,沟内填充秸秆的缝隙导致上方来沙的淤积,使得流速降低,使坡面侵蚀量减少。

不同方式的秸秆覆盖均可以减小径流动能,减少径流对土壤的剥蚀作用,促使泥沙沉积,降低径流含沙质量浓度,改变了坡面径流与侵蚀产沙量的关系,减少坡面侵蚀量。对比 H + G 处理和 H + MG + RH 处理,可以发现,2 个处理分别减少坡面侵蚀量 45.0% 和 46.2%,减少径流含沙质量浓度 49.2% 和 49.6%,且在坡面产流过程和侵蚀产沙过程中也表现出基本一致的趋势,因而 2 种处理具有类似的防蚀效果;然而 H + MG + RH 处理下的秸秆覆盖量及其覆盖面积皆小于 H + G 处理(表 1),在覆盖部位的设置方面,H + G 处理是在浅沟侵蚀带各沟道中填充了秸秆,而 H + MG + RH 处理换成了细沟沟头的秸秆覆盖缓冲带。由此可见,沟头部位覆盖的秸秆缓冲带较沟道内填充的秸秆在减少侵蚀方面有更好的效果。因此,当黄土坡面上形成侵蚀沟后,可以用玉米秸秆覆盖侵蚀活跃的沟头部位达到最优的防蚀效果,如果同时填充沟道,则可以获得更优的防蚀效果。

## 4 结论

(1)在沟蚀发育的黄土坡面上,不同方式的秸秆覆盖能够减少坡面径流量 7.2% ~ 13.8%,减少坡面侵蚀量 8.3% ~ 46.2%,降低径流平均含沙质量浓度 19.1% ~ 49.6%;秸秆覆盖可以延缓产流时间,减少坡面径流过程的波动,但对坡面径流量影响较小。对于坡面侵蚀产沙过程,秸秆覆盖可以降低侵蚀泥沙量,减小侵蚀产沙过程的波动,使其更接近线性趋势;秸秆覆盖通过改变坡面径流与侵蚀产沙

量的关系减少坡面侵蚀量,而不是通过减少坡面径流量来实现;比较2种秸秆覆盖方式,沟头覆盖秸秆缓冲带比沟内填充秸秆在减少侵蚀方面更有效。

(2)秸秆覆盖可以通过物理拦截作用滞留侵蚀泥沙,此外,还主要通过削弱径流挟沙能力和径流侵蚀力来减少侵蚀。细沟沟头和浅沟沟头秸秆缓冲带覆盖可分别减少径流流速 20.3% 和 44.2% ~

46.2%。沟内填充秸秆可降低径流流速 42.6%。不同方式的秸秆覆盖均可有效降低径流流速,从而达到减少坡面侵蚀的目的。

(3)在沟蚀发育的黄土坡面上,可以用玉米秸秆这一廉价易获取的材料覆盖侵蚀活跃的沟头部位达到最优的防蚀效果,如果同时填充沟道,则可以获得更优的防蚀效果。

### 参 考 文 献

- 1 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素 [J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 12-18.  
Cai Qianguo, Zhu Yuanda, Wang Shiyong. Research on processes and factors of rill erosion [J]. Advances in Water Sciences, 2004, 15(1): 12-18. (in Chinese)
- 2 郑粉莉,江忠善,高学田. 水蚀过程与预报模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 3 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 CSAE, 2008, 24(6): 64-68. (in Chinese)
- 4 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究 [J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 229-235.  
Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Lü Hongxing, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on a hillslope under artificial rainfall conditions [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 229-235. (in Chinese)
- 5 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]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 96-100.  
Dong Yuequn, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 96-100. (in Chinese)
- 6 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟沟头流动动力机制研究 [J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471-475.  
Wang Wenlong, Lei Alin, Li Zhanbin, et al. Study on dynamic mechanism of rills, shallow furrows and gully in the soil erosion chain [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 471-475. (in Chinese)
- 7 和继军,孙莉英,李君兰,等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 138-144.  
He Jijun, Sun Liying, Li Junlan, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 138-144. (in Chinese)
- 8 和继军,宫辉力,李小娟,等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响 [J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 90-97.  
He Jijun, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. The effects of rill development on runoff and sediment yielding processes [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 90-97. (in Chinese)
- 9 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(1): 139-149.
- 10 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169-175.  
Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169-175. (in Chinese)
- 11 原翠萍,雷廷武,张满良,等. 黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 36-43.  
Yuan Cuiping, Lei Tingwu, Zhang Manliang, et al. Sediment yields from the parallel watersheds in the hilly-gully regions of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 36-43. (in Chinese)
- 12 郑明国,蔡强国,陈浩. 黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3572-3581.  
Zheng Mingguo, Cai Qianguo, Chen Hao. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in gullied-hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3572-3581. (in Chinese)
- 13 王晓燕,高焕文,李洪文,等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 66-69.  
Wang Xiaoyan, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Experimental study on runoff and erosion under conservative tillage [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 66-69. (in Chinese)
- 14 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 CSAE, 2003, 19(3): 1-4. (in Chinese)
- 15 高焕文,李洪文,李问盈. 保护性耕作的发展 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43-48.

- Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenying, et al. Development of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43–48. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 Kukal S S, Sarkar M. Splash erosion and infiltration in relation to mulching and polyvinyl alcohol application in semi-arid tropics [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2010, 56(6): 697–705.
- 18 Gholami L, Sadeghi S H, Mehdi H. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 268–278.
- 19 McLaughlin D A. Erosion control effectiveness of straw, hydromulch, and polyacrylamide in a rainfall simulator [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 68(3): 221–227.
- 20 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)
- 21 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究 [J]. 作物学报, 2002, 28(4): 555–560.
- Li Jun, Wang Lixiang, Shao Ming'an, et al. Simulation of maize potential productivity in the Loess Plateau region of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4): 555–560. (in Chinese)
- 22 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.
- Zheng Fenli, Zhao Jun. Introduction of the artificial rainfall simulation hall and simulated rainfall equipment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 177–178. (in Chinese)
- 23 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)
- 24 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)
- 25 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型 [J]. 地理学报, 1956, 22(3): 201–222.
- Luo Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau [J]. Acta Geographic Sinica, 1956, 22(3): 201–222. (in Chinese)
- 26 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸥, 等. 沟头秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地沟蚀发育影响的试验研究 [J]. 泥沙研究, 2014(6): 73–80.
- Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. Effects of corn straw mulch buffer in the gully head on gully erosion of sloping cropland in the black soil region of Northeast China [J]. Journal of Sediment Research, 2014(6): 73–80. (in Chinese)
- 27 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)
- 28 徐国礼, 鲁翠珊, 王文龙. 沟道小流域切割裂度的量算和纵横向分布规律 [J]. 水土保持学报, 1988, 2(2): 17–23.
- Xu Guoli, Lu Cuihu, Wang Wenlong. Measurement of incised valley index and its transversal-longitudinal distribution in Xinzihe Watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 2(2): 17–23. (in Chinese)
- 29 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(1): 139–149.
- 30 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 effects on overland flow and sediment reduction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 870–875. (in Chinese)
- 31 Hussein J, Yu B, Ghadir 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.
- 32 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 50–53.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Study on runoff and infiltration process and hydraulic parameters characteristics with grass coverage [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 50–53. (in Chinese)