

# 模拟玉米茎秆流对土壤侵蚀的影响

尹晓爱<sup>1</sup>, 方乾<sup>1</sup>, 杨通杭<sup>1</sup>, 戴全厚<sup>1,2</sup>, 赵龙山<sup>1,2,3</sup>

(1.贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2.贵州省高原山地林木培育重点实验室, 贵阳 550025; 3.贵州大学生物多样性与自然保护区研究中心, 贵阳 550025)

**摘要:** 玉米茎秆流是降雨过程中经玉米冠层截留后沿茎秆流向根部的水量, 是种植坡地地表径流的重要组成部分, 对植物根部的土壤侵蚀过程具有重要影响。采用人工模拟降雨方法, 研究了成熟期玉米茎秆流对坡地土壤侵蚀的影响。试验土槽长为 0.40 m、宽为 0.23 m、深为 0.14 m; 采用直径为 2 cm 的 PVC 管模拟成熟期玉米茎秆, 高度为 1.2 m; 模拟茎秆流量为 5, 10, 15 g/s, 用相同降雨条件下无茎秆流坡地作为对照措施; 降雨强度为 60, 90, 120 mm/h, 降雨历时 108 min, 坡度为 10°。结果表明: (1) 与对照措施相比, 茎秆流具有加快坡地地表产流的作用; (2) 模拟茎秆流条件下地表产流量和产沙量均高于对照, 相较无茎秆流坡地, 3 个降雨强度下各茎秆流量的产流贡献率为 14.90%~43.10%, 产沙贡献率为 12.47%~26.75%; (3) 茎秆流在茎秆周围地表形成细小股流, 促使坡地土壤侵蚀过程由面蚀向细沟侵蚀转变, 从而增加了坡地土壤侵蚀量。因此, 在坡地水土流失计算与评价中应考虑茎秆流的土壤侵蚀作用。

**关键词:** 茎秆流; 土壤侵蚀; 产流量; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0067-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.011

## Effect of Simulated Corn Stem Flow on Soil Erosion

YIN Xiaoi<sup>1</sup>, FANG Qian<sup>1</sup>, YANG Tonghang<sup>1</sup>, DAI Quanhou<sup>1,2</sup>, ZHAO Longshan<sup>1,2,3</sup>

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2.Key Laboratory of Plateau Mountain Forest Cultivation in Guizhou Province, Guiyang 550025; 3.Research Center for Biodiversity and Nature Reserve, Guizhou University, Guiyang 550025)

**Abstract:** Corn stem flow is the amount of water flowing along the stalk to the root after intercepted by the corn canopy during rainfall. It is an important component of surface runoff on the slope and has an important effect on the soil erosion process at the root of the plant. In this paper, artificial rainfall simulation method was used to study the effect of corn stem flow on soil erosion in sloping field. The test soil trough was 0.40 m long, 0.23 m wide, and 0.14 m deep. A PVC pipe with a diameter of 2 cm was used to simulate the corn stalk at the maturity stage and the height was 1.2 m. The simulated stem flow was 5, 10 and 15 g/s, with the same rainfall under the conditions, the stalk-free sloping land was used as a control measure. The rainfall intensity was 60, 90, 120 mm/h, the rainfall lasted 108 minutes, and the slope was 10°. The results showed that: (1) Compared with the control measures, the stem flow has the effect of accelerating sloping surface runoff. (2) The surface runoff and sediment yield under simulated stem flow were higher than the control, compared with no stem flow slope, under three rainfall intensities, the contribution rate of runoff from the three stems was 14.90%~43.10%, and the contribution rate of sand production was between 12.47% and 26.75%. (3) The stem flow formed a small surface around the stem, and the currents caused the soil erosion process to change from surface erosion to gully erosion, thereby increased the slope soil erosion amount. Therefore, the soil erosion of stem flow should be considered in the calculation and evaluation of soil erosion on slope farmland.

**Keywords:** stem flow; soil erosion; runoff; sediment yield

收稿日期: 2019-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41867014); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1041, 黔科合[2016]支撑 2835 号); 贵州省优秀青年科技人才项目(黔科合平台人才[2019]5671); 贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007); 贵州省高原山地林木培育重点实验室项目(黔科合平台人才[2019]5102)

第一作者: 尹晓爱(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: 1245657727@qq.com

通信作者: 赵龙山(1985—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: longshanzh@163.com

降雨被作物冠层截留后沿作物茎秆流向土壤表面,形成茎秆流<sup>[1-2]</sup>。有研究<sup>[3]</sup>表明,茎秆流到达地表后,一方面可以继续沿作物根系渗入土壤,增加土壤含水量;另一方面,一部分茎秆流在到达地表后继续沿坡面流动,参与形成地表径流。就坡地土壤侵蚀而言,由于茎秆流促进了坡地地表径流的形成,导致坡地地表水力特性发生变化,进而对地表径流的土壤剥蚀和搬运能力产生影响。已有的研究<sup>[1-3]</sup>发现,茎秆流是影响土壤侵蚀的重要因素之一,主要原因是茎秆流增加了表层土壤水分含量,在连续降雨条件下土壤更容易被地表径流侵蚀和搬运。

早在 1940 年 Haynes<sup>[4]</sup> 初步研究了茎秆流的特征及影响因素。随后, Gwynne 等<sup>[5]</sup> 又进一步对茎秆流进行了定量研究,开展了对玉米茎秆流的测量工作。这些研究对人们了解茎秆流的产生过程和结果发挥了重要作用。近年来,随着人们对农作物水土保持作用机理研究的深入,国内关于茎秆流的研究<sup>[6-8]</sup> 也逐渐增多,如对黄土高原地区玉米不同生长阶段穿透雨、茎秆流和冠层截留分别占总降雨的比例研究表明,降雨经成熟期玉米冠层再分配后茎秆流占总降雨量的最大比例约为 70%;刘战东等<sup>[9]</sup> 基于水量平衡法量化分析了不同生长阶段夏玉米冠层下的茎秆流量等。此外, Bui 等<sup>[10]</sup> 研究指出,茎秆流流量随降雨强度增大呈现增加趋势;马波等<sup>[11]</sup> 也得出相似的结论。由此可见,茎秆流是降雨过程中玉米对降雨再分配的主要形式;同时,茎秆流量的多少与降雨强度有直接联系。

以上分析表明,茎秆流在玉米植株中的降雨再分配作用广泛受到人们的关注。然而当前对玉米茎秆流的研究<sup>[12-14]</sup> 大多集中在茎秆流占总降雨量的比例上,而玉米茎秆流对坡地地表产流产沙过程及土壤侵蚀机制的影响却显见报道。鉴于此,本研究采用人工模拟降雨试验方法,以成熟期玉米植株为研究对象,定量研究不同降雨强度和茎秆流量条件下玉米茎秆流对坡地地表土壤侵蚀的影响,以期为人们了解坡地土壤侵蚀过程与机理提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 试验设计

试验于 2018 年 4—11 月在贵州大学土壤侵蚀模拟实验室完成。试验装置由人工模拟降雨机、模拟茎秆流装置和土壤侵蚀槽组成(图 1)。人工模拟降雨机为南京林业大学生产的下喷式降雨机(NLJY—10—01 型),其降雨面积为 4 m×4 m,降雨高度为 4 m,降雨均匀度>0.80。成熟期玉米茎秆用直径为 2 cm 的 PVC 管模拟,高度为 1.2 m。土壤侵蚀槽长 0.4 m,宽 0.23 m,深 0.14 m,填充的土层厚度为 12

cm,侵蚀槽下部设置 V 型集流口,用来收集地表径流与泥沙样品,侵蚀槽底部每间隔 10 cm 打 1 个小孔(孔径 1 cm),以便在降雨过程中及时排出入渗水。每个侵蚀槽内放置 1 株模拟的成熟期玉米植株,其位置在距土壤侵蚀槽下部集流口 30 cm 处。试验坡度为 10°,降雨强度为 60,90,120 mm/h。

茎秆流采用马氏瓶原理模拟,模拟茎秆流流量为 5,10,15 g/s,试验中所用茎秆流量是以成熟期单株玉米叶片面积及茎秆流量占降雨量的比例进行换算而得,其茎秆流量占降雨总量的 20%~90%。

试验土壤采自陕西省吴起县坡耕地 0—20 cm 的表层土。土壤类型为黄绵土,土壤质地按国际制进行划分为砂壤土,黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为 5.10%, 59.88%, 34.66%<sup>[15-16]</sup>。试验前,先将土壤自然风干(含水率控制在 10%左右),后用木板压碎大颗粒土壤,然后过筛(孔径 5 mm),以去除土壤中的大颗粒土壤和动植物残体,保证土壤的均匀性。最后,将处理好的土壤分 2 层装入土壤侵蚀槽,每层填土厚度 6 cm,填土容重为 1.3 g/cm<sup>3</sup>。

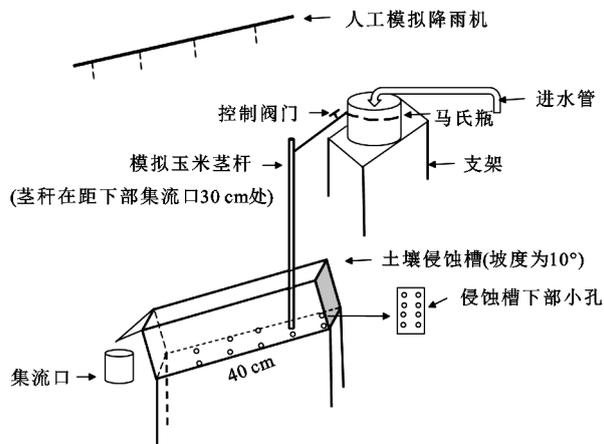


图 1 模拟试验装置示意

### 1.2 样品采集与测定

填土完成后进行 20 min 预降雨,降雨强度为 20 mm/h。然后放置室内静置 12 h,以保证试验土壤初始含水量相同。

试验正式开始后,分别在设计的降雨强度(60, 90, 120 mm/h)下先降雨 60 min,并以 2 min 为间隔收集所有径流泥沙样,待地表径流稳定后通过 PVC 模拟玉米茎秆添加 5 g/s 的茎秆流;当地表径流再次稳定后,以 2 min 为间隔连续收集 6 个稳定径流泥沙样品(此阶段连续降雨约 12 min);样品收集完成后,停止降雨和模拟茎秆流,从土槽下部开始以 5 cm 为间隔测量地表细沟特征(长、宽、深);细沟特征测量完成后,再次打开降雨机模拟降雨,并以同样的方法收集径流泥沙样品,待地表径流达到稳定后再添加 10 g/s 的茎秆流,并收集 6 个稳定径流泥沙样品(此阶

段连续降雨 12 min),然后停止降雨和模拟茎秆流并测量地表细沟特征;茎秆流为 15 g/s 的试验过程与茎秆流为 10 g/s 相同。试验设置 3 次重复,以无茎秆流坡地为对照。

降雨试验结束后,采用称重法测量产流量,采用烘干法测量产沙量。

### 1.3 数据分析

为研究茎秆流对土壤侵蚀的影响,用产流、产沙贡献率来量化茎秆流对地表产流量和产沙量的贡献。产流、产沙贡献率的计算公式为:

产流贡献率计算公式为:

$$SCR = \frac{(R_1 - R_0)}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:SCR 为茎秆流对地表径流的贡献率(%); $R_1$  为有模拟茎秆流条件下的地表径流量(g/min); $R_0$  为对照措施,即无模拟茎秆流条件下的地表径流量(g/min)。

产沙贡献率计算公式为:

$$SCS = \frac{(S_1 - S_0)}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:SCS 为茎秆流对产沙的贡献率(%); $S_1$  为有模拟茎秆流条件下的地表产沙量(g/min); $S_0$  为对照措施,即无模拟茎秆流条件下的地表产沙量(g/min)。

采用 Excel 2013 进行数据整理与图表绘制,用 SPSS 20.0 进行数据显著性分析( $p=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟茎秆流对产流的影响

由图 2 可知,在其他试验条件相同的情况下,3 种降雨强度下的产流变化趋势基本一致,均表现为降雨强度越大,坡面产流越快。在模拟降雨开始后 60 min 内产流量先增加后逐渐趋于稳定。

由图 2 还可知,在降雨 60 min 后,添加茎秆流时坡地径流量快速增加,最终逐渐趋于稳定状态。在降雨强度为 60 mm/h 下,茎秆流流量 5,10,15 g/s 下的平均产流速率分别为 422.4,758.4,1 114.8 g/min,分别高出相同条件下对照组的 81.96%,88.84%,92.73%。在降雨强度为 90 mm/h 下,茎秆流流量 5,10,15 g/s 下的平均产流速率分别为 480.0,808.2,1 090.2 g/min,分别比相同条件下的对照组高 70.13%,82.26%,87.40%。在降雨强度为 120 mm/h 下,茎秆流流量 5,10,15 g/s 下的平均产流速率分别为 645.0,853.2,1 223.4 g/min,分别高出相同条件下对照组的 53.39%,68.71%,77.83%。总之,加入模拟茎秆流后均使产流速率增加。

由图 3 可知,待坡面产流达到稳定状态后,3 个茎秆流处理较对照组间的产流量表现出显著增加( $p<0.05$ ),

3 个茎秆流之间的产流量值也表现出显著差异( $p<0.05$ )。在 3 个茎秆流流量间,茎秆流流量 15 g/s 下的产流量较大。

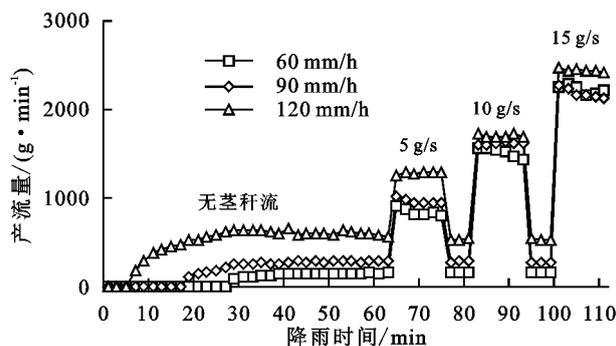


图 2 模拟茎秆流对产流量的影响

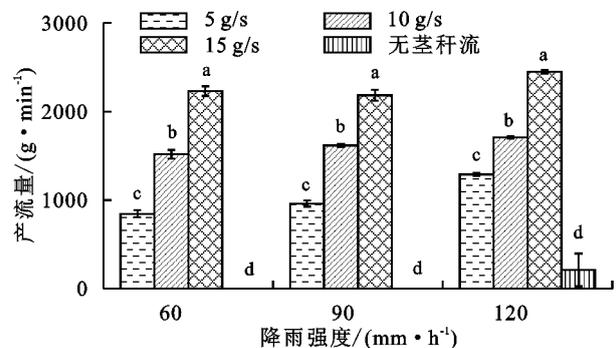


图 3 模拟茎秆流流量稳定下的产流量

由表 1 可知,在整个降雨过程中,相同茎秆流流量下产流贡献率随降雨强度的增加而减小。3 个降雨强度下,茎秆流量 15 g/s 对产流的贡献率较大,最大产流贡献率高达 43.10%;模拟茎秆流流量 5 g/s 对产流贡献率较小,最小产流的贡献率低至 14.90%。

表 1 茎秆流产流产沙贡献率

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	SCR/%			SCS/%		
	5 g/s	10 g/s	15 g/s	5 g/s	10 g/s	15 g/s
60	16.30	29.30	43.10	26.72	25.32	20.07
90	16.00	26.90	36.40	23.91	24.22	16.47
120	14.90	19.70	28.30	19.51	15.29	12.47

### 2.2 模拟茎秆流对产沙的影响

由图 4 可知,在其他试验条件相同情况下,坡面产沙量总体上随降雨强度增大而加快。在降雨前 60 min 内产沙量呈逐渐增加的趋势。模拟降雨 60 min 后,添加茎秆流使坡地产沙量先大幅度增加后逐渐减少。同时,茎秆流下的产沙量明显高于对照组的产沙量。3 个茎秆流下的最大产沙量均出现在添加茎秆流初期,并随着降雨的进行,产沙量逐渐降低。

由图 5 可知,待坡面产沙达到稳定状态后,3 个茎秆流处理与对照组间的产沙量表现出显著差异( $p<0.05$ ),3 个茎秆流间的产沙量无显著差异( $p>0.05$ )。与对照相比,模拟茎秆流下的产沙量显著增加。其中,在降雨强度 60 mm/h 下,茎秆流流量为 15 g/s 时的坡地产沙量最大,最大产沙量为 102.01 g/min。

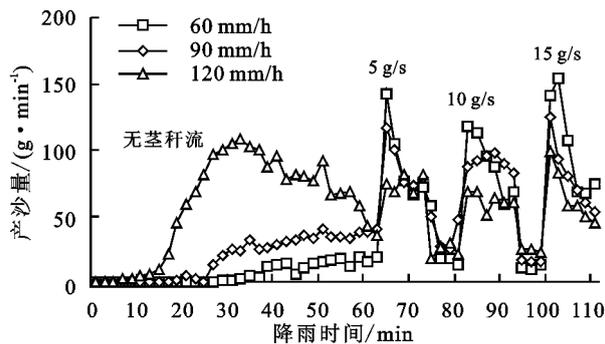


图 4 模拟茎秆流对产沙量的影响

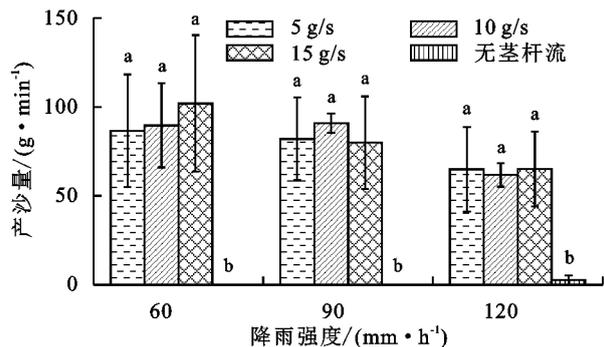


图 5 模拟茎秆流量稳定下的产沙量

由表 1 可知, 相较无茎秆流坡地, 3 个茎秆流量对不同降雨强度下的坡地产沙贡献率存在差异, 降雨强度越大其茎秆流产沙贡献率越小。3 个茎秆流量对坡地的产沙贡献率为 12.47%~26.72%。其中, 茎秆流量为 5 g/s 下的产沙贡献率为 19.51%~26.72%, 茎秆流量为 10 g/s 下的产沙贡献率为 15.29%~25.32%, 茎秆流量为 15 g/s 下的产沙贡献率为 12.47%~20.07%。

### 2.3 茎秆流对细沟发育的影响

在试验过程中, 记录了不同降雨强度下细沟出现的时间。降雨强度为 60, 90, 120 mm/h 下细沟出现的时间分别为 47, 36, 10 min, 即降雨强度越大, 细沟出现越早。

由图 6 可知, 不同茎秆流下地表细沟宽度和深度的变化均表现出一定规律, 在降雨强度为 60 mm/h 下, 随茎秆流流量增加, 细沟逐渐变宽, 细沟深度呈现缓慢增加的趋势, 坡地侵蚀过程由面蚀向细沟侵蚀转变, 细沟沟壁崩塌, 沟底下切, 导致了细沟变宽变深。当降雨强度为 90 mm/h 时, 细沟的宽度变化不明显, 随茎秆流量增加, 细沟深度加深, 15 g/s 茎秆流下, 细沟的深度达到最大。当降雨强度为 120 mm/h 时, 随茎秆流量的增加, 细沟宽度的变化情况与降雨强度为 60, 90 mm/h 具有相似的规律, 均表现为随茎秆流增加, 细沟变宽。

总体而言, 在距离土槽下部 30 cm 处, 即茎秆所在位置处细沟的宽度和深度均为最大值。茎秆流对茎秆周围土壤的冲刷较其他地方更强, 导致茎秆周围土壤侵蚀形式变化加快, 更早的从雨滴击溅侵蚀发展

为面蚀, 再发展到细沟侵蚀阶段。细沟出现使得径流集中, 加大了径流对坡地土壤的剥蚀能力和加快了搬运速度, 使得坡地土壤侵蚀增加。由于茎秆在距离土槽上部 30 cm 处, 导致土槽上部侵蚀大于下部侵蚀, 因此, 在图 6 中表现为土槽上部细沟宽度和深度增加幅度要远大于下部的增加幅度。同时泥沙在径流的作用下不断向下坡搬运, 一部分泥沙在搬运过程中发生沉积, 导致细沟宽度由宽变窄, 深度由深变浅。

## 3 讨论

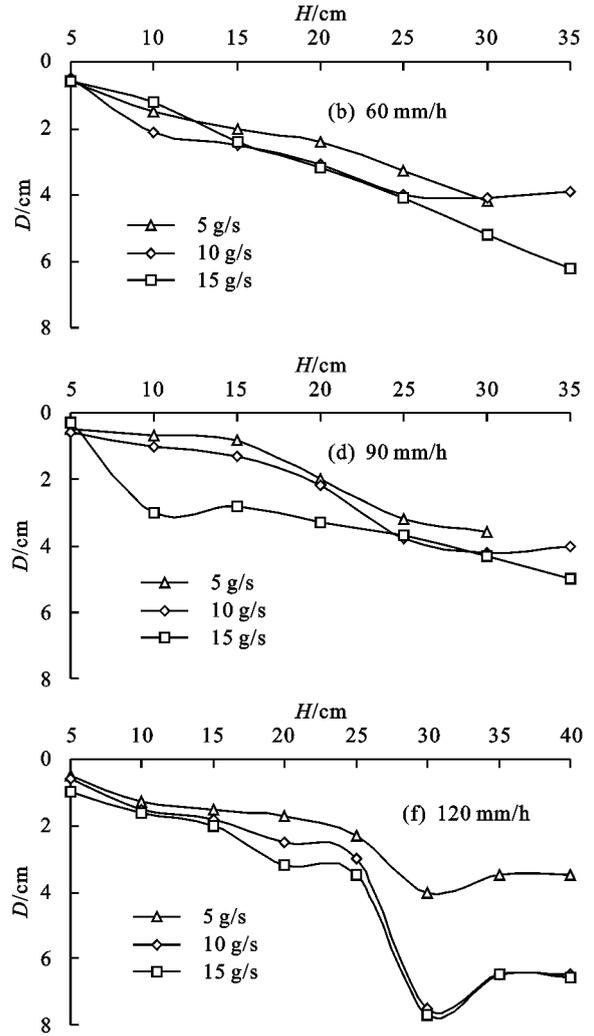
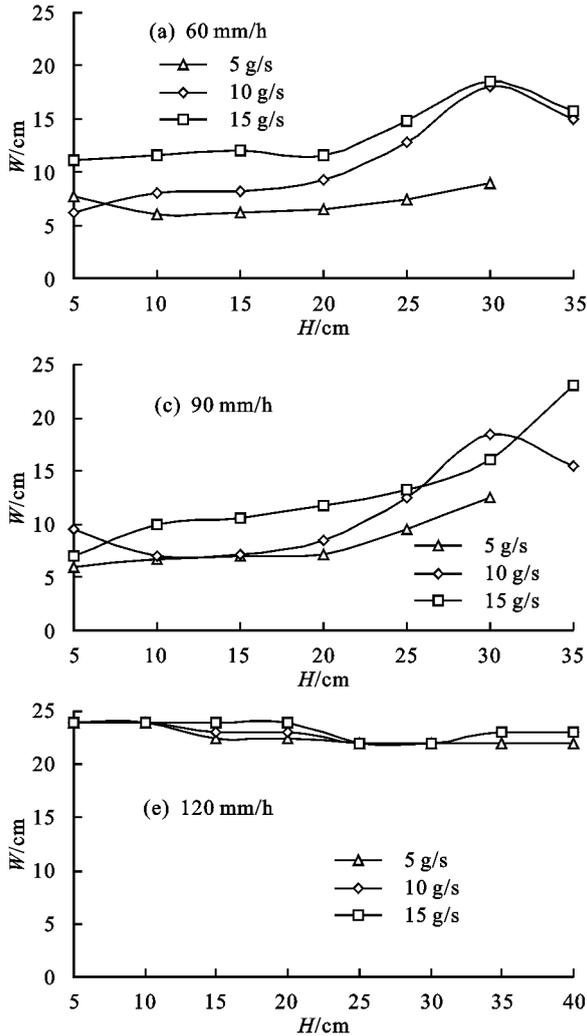
坡面径流是造成坡地水土流失的主要原因, 产流的快慢主要受降雨条件和土壤性质的影响<sup>[17]</sup>。侵蚀产沙作为坡面土壤侵蚀过程中的主要搬运物质, 是衡量坡地土壤侵蚀作用的重要指标之一<sup>[18]</sup>。本试验研究表明, 模拟茎秆流下的坡面产流量和产沙量均显著高于空白对照, 导致这一状况的原因在于部分降雨沿作物茎秆流至地表, 产生的茎秆流参与了地表径流的形成, 加快了坡地地表径流的汇流速度, 直接加剧了坡地土壤侵蚀<sup>[19]</sup>; 另一方面是由于茎秆流自身具有潜在剥离和搬运土壤的能力<sup>[18,20]</sup>。本试验中茎秆周围地表径流对土壤的冲刷随茎秆流的产生而加大。有研究<sup>[21]</sup>表明, 土壤的分离速率随地表径流量的增大而增大, 茎秆流的产生加速了茎秆周围的土壤分离, 从而增加了坡地产沙量, 但随降雨历时的延长, 产沙量的变化量逐渐变小, 造成产沙量随降雨历时变化的原因是当降雨到一定程度时, 雨滴对坡面表层土壤的冲击使得松散土粒分散, 加之雨滴对坡面存在压实作用, 造成坡面产生结皮, 同时坡面出现薄层水流, 结皮与薄层水流的结合使得坡面土壤对雨强的抗击打能力增强, 因而径流携带泥沙的能力减弱, 含沙量逐渐减小<sup>[1]</sup>。此外, 在本试验中, 降雨强度越大, 坡面产流越快。这是由于试验所用土壤为黄绵土, 坡面产流方式属于超渗产流, 即降雨强度大于土壤入渗速率时, 雨滴在地面汇集直接形成地面径流, 导致产流时间提前<sup>[22-23]</sup>, 所以降雨强度越大, 坡面产流越早。

从细沟的变化来看, 在茎秆周围的细沟宽度和深度较其他位置的更大, 说明茎秆流的存在加快了茎秆周围土壤的细沟侵蚀。本试验中, 细沟的整体变化表现为沟头不断前进, 沟宽不断增加, 沟深不断变深。在茎秆流产生后, 由于茎秆流在茎秆基部周围产生集中水流, 坡地发生细沟侵蚀。在稳定的茎秆流条件下, 茎秆周围土壤表面的径流流速和产流量均增加, 加快了土壤分离和径流运输的速度<sup>[23]</sup>。许多研究<sup>[24]</sup>表明, 细沟发育前后坡地产沙过程存在很大差异, 在细沟发育的早期, 坡地产沙量呈现增加趋势。而当细沟发育完成后, 细沟侵蚀逐渐减弱, 因为细沟发育进入稳定阶段,

坡地产沙量相对细沟发育早期减少。

茎秆流会影响土壤侵蚀的发生过程,在本试验中,茎秆流的出现使坡地由面蚀向细沟侵蚀转变,加剧了坡地的土壤侵蚀。玉米茎秆流影响坡地水土流失机制是通过改变降雨的再分配而产生的,在降雨期间,雨水被玉米冠层转化成了穿透雨、冠层截留和茎秆流,冠层截留降低了雨滴到达地表的径流量及雨滴的击溅能力,减少了坡地土壤侵蚀。但是,截留的降雨在茎秆处汇集成为茎秆流,使分散的降雨集中形成细小股流,沿着茎秆流到坡地表面,促进了坡面地表

径流的形成<sup>[24]</sup>。同时,集中的地表径流加剧了坡地细沟侵蚀的发生,由于茎秆的位置在距离土槽上部30 cm处,茎秆流进入土壤表面后主要对茎秆周围的土壤进行冲刷和剥蚀,使茎秆周围的土壤侵蚀加大,细沟的发育较快,在细沟开始发育时,坡面跌坎、崩塌相继发生,使得径流量急剧增加,当细沟发展到一定的程度后,可被冲刷的土壤降低,坡地细沟侵蚀进入稳定阶段,下坡细沟出现堆积现象,致使坡地产沙量呈下降趋势。在本研究中表现为土槽上部细沟的宽度和深度均比土槽下部大。



注:图中W表示细沟的宽度;D表示细沟的深度;H表示玉米茎秆与集流口间的距离。

图6 不同降雨强度下模拟茎秆流对细沟发育的影响

此外,不同生长时期下玉米植株茎秆流均会对土壤侵蚀造成影响。但在本试验中,仅仅考虑了直径为2 cm的PVC管模拟成熟期玉米植株茎秆流产生对土壤侵蚀的影响,并通过试验研究结果揭示了成熟期玉米茎秆流对地表产流量、产沙量及细沟发育的影响。在下一步的研究工作中将考虑不同生长时期玉米植株茎秆流对坡地土壤侵蚀的影响,同时,考虑根系对土壤紧实度和雨水入渗的影响、地表微地形的差异及玉米茎秆表面糙度等特征。

## 4 结论

(1)玉米茎秆流对土壤侵蚀有显著的影响,茎秆流加速了径流对地表土壤的冲刷,从而加重了坡地的土壤侵蚀。

(2)3种茎秆流流量的产流贡献率为14.90%~43.10%,产沙贡献率为12.47%~26.75%。随降雨强度增大,各处理下的产流量增大,产沙量先增大后趋于稳定状态。

(3)茎秆流流量的增加使细沟宽度和深度均增

加,加剧了茎秆基部周围细沟侵蚀的发生。

综上,在研究玉米坡地土壤侵蚀机制时,应考虑茎秆流对坡地的土壤侵蚀作用。

#### 参考文献:

- [1] 马波,吴发启,陈宇,等.玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J].农业工程学报,2011,27(1):118-123.
- [2] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [3] Lamm F R, Manges H L. Partitioning of the sprinkler irrigation amount by a corn canopy[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 909-918.
- [4] Haynes J L. Ground rainfall under vegetative canopy of crops[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1940, 32(1): 176-184.
- [5] Gwynne M D, Glover J. Light rainfall and plant survival: Measurement of stem flow run-off[J]. Nature, 1961, 191(3): 1321-1322.
- [6] 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.
- [7] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.
- [8] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J].土壤学报,2015,52(1):48-56.
- [9] 刘战东,刘祖贵,张寄阳,等.夏玉米降雨冠层截留过程及其模拟[J].灌溉排水学报,2015,34(7):13-17.
- [10] Bui E N, Box J E J. Stemflow, rain throughfall, and erosion under canopies of corn and sorghum[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(1): 242-247.
- [11] 马波,李占斌,马璠,等.模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响[J].生态学报,2015,35(2):497-507.
- [12] Van Elewijck L. Influence of leaf and branch slope on stemflow amount[J]. Catena, 1989, 16: 525-533.
- [13] 马波,吴发启,马璠,等.叶面积和降雨强度对大豆茎秆流的影响[J].中国水土保持科学,2008,6(6):58-62.
- [14] 马璠,吴发启,马波,等.叶面积和降雨强度对玉米茎秆流量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):25-28.
- [15] 董莉丽,马孝燕,胡丹,等.吴起县退耕还林样地土壤粒径分布的单一和多重分形特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):111-115.
- [16] 盛贺伟,蔡强国,孙莉英.黄土地对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):31-35.
- [17] 赵艳茹,王瑄,丘野,等.模拟降雨下土壤剥蚀率和水流含沙量的关系[J].水土保持学报,2010,24(5):97-100.
- [18] 郑世清,周佩华,周保林.黄土高原沟壑区土壤抗冲性研究:以黄委会西峰水土保持试验站为例[J].水土保持通报,1994,14(1):12-16.
- [19] 高素娟,王占礼,黄明斌,等.黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程试验研究[J].水土保持通报,2010,30(1):63-68.
- [20] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.水蚀过程中裸露陡坡耕地土壤侵蚀特征[J].水土保持学报,2018,32(1):74-79.
- [21] 郭继成,张科利,董建志,等.西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J].土壤学报,2013,50(6):1102-1108.
- [22] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.
- [23] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [24] 杨帆,姚文艺,戴文鸿,等.植被影响下的坡面水力侵蚀研究进展[J].人民黄河,2013,35(1):72-74.
- (上接第 66 页)
- [13] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 82: 10-26.
- [14] James M R, Robson S, D'oleire-Oltmanns S, et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment[J]. Geomorphology, 2017, 280: 51-66.
- [15] 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.
- [16] 白建宏.东北黑土区侵蚀沟分级初探[J].中国水土保持,2017(10):41-42.
- [17] 国家标准局 GB 7930-87, 1:500, 1:1000, 1:2000 地形图航空摄影测量内业规范[S].北京:中国标准出版社,1987:710-711.
- [18] 赵文强,林舟.SfM 精细表面测量:分辨率和精度的评估及误差分析[J].地理与地理信息科学,2016,32(6):25-31.
- [19] Bater C W, Coops N C. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation[J]. Computers and Geosciences, 2009, 35(2): 289-300.
- [20] James M R, Robson S, Smith M W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(12): 1769-1788.
- [21] 冯林,李斌兵.利用无人机倾斜影像与 GCP 构建高精度侵蚀沟地形模型[J].农业工程学报,2018,34(3):88-95.
- [22] Remondino F, Guarnieri A, Vettore A. 3D modeling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning? [R]. Proceedings of the Electronic Imaging, 2004: 216-225.