

小麦秸秆长度、覆盖量对坡面产流产沙的影响

曾建辉¹, 李占斌^{1,2}, 马波^{1,2}, 王杉杉², 张泽宇¹, 王阳修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,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;3.西北农林科技大学,陕西 杨凌 712100)

摘要:为定量研究小麦秸秆覆盖对坡面产沙产流过程及减水减沙效益的影响,采用室内人工模拟降雨试验,研究在降雨强度为90 mm/h时,不同秸秆长度和秸秆覆盖量下的坡面产流产沙特征和产流产沙过程规律,结果表明:(1)在相同秸秆长度下,随秸秆覆盖量增加,产流量产沙量极显著减少($p < 0.01$)。相同覆盖量水平下随秸秆长度增加,产流量显著增加($p < 0.05$),在4.5 t/hm²覆盖量下产沙量极显著增加($p < 0.01$)。(2)秸秆覆盖坡面的初始产流时间较裸露坡面延迟6.23倍,产流量平均下降19.5%,产沙量下降31.6%。覆盖措施通过保护土壤的结构有效抑制了细沟侵蚀过程向切沟侵蚀发展。产流产沙过程受秸秆长度和覆盖量的交互作用影响,交互效应对产流过程的影响更突出。(3)随覆盖量增加,减水减沙效益极显著增加($p < 0.01$);随长度增加,减水减沙效益分别减少为17.26%,27.97%。不同覆盖条件下的坡面产流量、产沙量和减水、减沙效益均与秸秆长度、秸秆覆盖量呈二元线性关系。(4)在当前试验条件下,当秸秆长度为3~5 cm,覆盖量为4.5 t/hm²时达到最优减水减沙效益。

关键词: 秸秆长度; 秸秆覆盖量; 侵蚀量; 产流产沙过程; 水土保持效益

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0098-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.015

Effects of Wheat Straw Length and Coverage on Runoff and Sediment Yield

ZENG Jianhui¹, LI Zhanbin^{1,2}, MA Bo^{1,2}, WANG Shanshan², ZHANG Zeyu¹, WANG Yangxiu³

(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, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: An artificial rainfall simulation experiment was conducted at the intensity of 90 mm/h, under different straw lengths and different straw coverage to study the characteristics of runoff and sediment production on the slope and the regularity of runoff and sediment production process. In order to quantify the effects of different wheat straw lengths and mulches on the characteristics and process mechanisms of slope runoff and sediment yield, as well as the benefits of water and sediment reduction efficiency under different straw conditions. Results showed that: (1) Under the same straw length, with the increase of straw coverage, the yield and sediment yield decreased significantly ($p < 0.01$). At the same coverage level, with the increase of straw length, the yield increased significantly ($p < 0.05$), and the yield of sand increased significantly under the coverage of 4.5 t / hm² ($p < 0.01$). (2) The initial runoff time of the straw-covered slope surface was 6.23 times longer than that of the bare slope surface, and the average production flow rate decreased by 19.5%, the sediment yield decreased by 31.6%. Covering measures effectively inhibited the trend of trench erosion to cut trench erosion by protecting the structure of the soil. The process of runoff and sediment production is affected by the interaction of straw length and mulch. The effect is more prominent on the process of runoff. (3) With the increase of coverage, the benefits of water and sediment reduction increased significantly ($p < 0.01$); with the increase of length, the benefits of water and sediment reduction decreased to 17.26% and 27.97% respectively. The slope runoff yield, sediment yield, water reduction, and sand reduction benefits under the different covering conditions have a binary linear relationship with straw length and straw coverage. (4) Under the experimental conditions, when the straw length is 3 ~ 5 cm, with the amount of

收稿日期:2020-01-09

资助项目:国家自然科学基金项目(41771311,41561144011)

第一作者:曾建辉(1997—),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:ZJH15937155026@163.com

通信作者:马波(1982—),男,陕西西乡人,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail:soilcrop@163.com

4.5 t/hm², the optimal water and sediment reduction benefits are achieved.

Keywords: straw length; straw coverage; erosion amount; runoff and sediment production; soil and water conservation benefits

由于黄土高原的丘陵沟壑地形,坡耕地成为主要生产用地。频繁的人为耕作活动,导致此地区的土壤理化性质发生巨大改变,从而引起土壤侵蚀现象发生^[1-2]。与传统的定期翻压、顺坡而作等耕作手段不同,坡耕地水土保持耕作技术采取横向起垄、少耕免耕、秸秆覆盖等方式,很好地保存了土壤养分,减少水土流失现象的发生^[3]。坡耕地水土保持耕作技术通过改变地表微地形,影响农田水分流通和转化^[4],达到保持水土、节水增产的目的。秸秆覆盖作为典型的水土保持耕作措施具有短期的即时效益和长期改良效益。降雨打击地表使表土层结构被破坏,水分入渗率降低则导致地表径流更易形成,从而大大提高了土壤侵蚀发生的可能。通过将秸秆平铺于土壤表面,减少了降雨过程中雨滴对地表直接作用的能量,从而减少土粒被分散的几率,同时秸秆覆盖延缓了地表径流的产生时间,削弱了洪峰流量^[5]。秸秆还田对土壤的长期效益则表现在秸秆分解增加土壤的养分含量,改善土壤的理化性质提升土壤的稳定性和抗侵蚀能力^[6]。Adéla 等^[7]研究发现,通过改变土地利用方式和增加地表覆盖能较好的调控水土流失状况,多数情况下,裸地的土壤表层水分入渗率相当于土地表面被保护土壤的30%^[8],有覆盖物的土地相较于裸地而言最终产沙量明显减少^[9];唐涛等^[10]采用人工降雨的方式研究了降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应,分析秸秆覆盖量与径流量、土壤流失量间的关系发现,秸秆覆盖具有显著的减少水土流失的作用;车明轩等^[11]研究了不同雨强和坡度下覆盖措施对紫色土坡面产流特征的影响表明,覆盖措施具有显著的滞流作用;刘柳松等^[12]研究在秸秆覆盖条件下,具有不同初始含水率的土壤其坡面产流产沙过程发现,秸秆覆盖对干、湿态土壤的产沙速率影响显著,且30%秸秆覆盖率水土保持效果较好。现有研究分别从不同秸秆覆盖量、不同雨强和坡度条件、不同土壤条件等方面探究了秸秆覆盖措施对坡面土壤产流产沙过程的影响,但秸秆覆盖量与秸秆长度的交互作用对坡面产流产沙过程的影响目前还鲜有文献报道。本文将不同长度的秸秆按照不同覆盖量水平进行坡面覆盖,通过人工模拟降雨,研究固定降雨强度和坡度下的黄土坡面的产流产沙过程,以期得出秸秆长度和覆盖量对坡面产流产沙过程的作用规律,并在此基础上寻求具有最优水土保持效益的秸秆长度和覆盖量的组合方式,为实际耕作过程中坡面水土流失防治以及

资源的合理利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

为了研究秸秆长度和覆盖量对坡面产流产沙的影响机制,于2016年7—9月在西北农林科技大学水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行室内模拟降雨试验。喷头高度为16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的98%以上^[13]。

供试秸秆为自然晒干的小麦秸秆,截成3~5, 8~10, 13~15 cm 3个试验长度。秸秆覆盖量设计为1.5, 2.5, 3.5, 4.5 t/hm² 4个处理水平,并以裸露坡面作为对照。试验土壤为陕西省延安市安塞区的黄绵土,细砂和粉砂占总重量的60%左右,取表层0—20 cm的耕层土,将其过5 mm×5 mm的筛。选取15°这一临界坡度作为试验坡度^[14-15],并根据黄土高原地区侵蚀性降雨标准($I=1.52$ mm/min)^[16],将雨强设定为90 mm/h,降雨时长1 h,重复2次,人工模拟降雨总次数为26次。

试验采用长4 m×宽1 m×深0.5 m的坡度可调节式土槽(图1),实际装土深度为0.4 m,土槽一端设计有集流装置,便于收集径流泥沙样。采用分层填土的方法,控制土壤容重为1.2 g/cm³,各土层厚度为5 cm,装土完成后刮平表面,确保微地形起伏程度不超过单个土块大小,之后将试验所需秸秆按照设定要求铺撒于土体上方进行人工模拟降雨试验。降雨过程中记录初始产流时间,以2 min为间隔,收集径流泥沙样的时间为1 min,1 h后停止降雨,称量泥沙样液重量并采用烘干法测定泥沙含量。

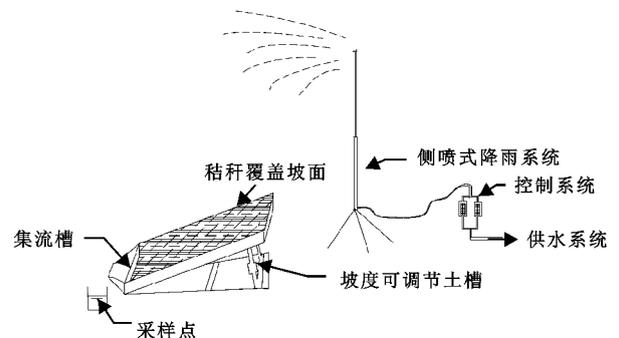


图1 试验装置示意

1.2 数据分析

径流系数是评价降雨过程中径流量的重要参数之一,能反映地形、坡度、地表覆盖物、土壤特性对降雨条件下产汇流过程的影响,计算公式^[17]为:

$$\psi = Q/Q_0$$

式中： ψ 为径流系数； Q 为单位时间内的降雨总量(L)； Q_d 为单位时间内的径流总量(L)。

减水减沙效益是衡量秸秆覆盖措施的水土保持效益的重要指标，其计算公式为：

$$RRE(\%) = (Q_a - Q_b) / Q_a$$

$$SLRE(\%) = (S_a - S_b) / S_a$$

式中：RRE 为减水效益(%)；SLRE 为减沙效益(%)； Q_a 为裸地产流量(L/m²)； Q_b 为秸秆覆盖条件下的产流量(L/m²)； S_a 为裸地产沙量(g/m²)； S_b 为秸秆覆盖下的坡面产沙量(g/m²)。

采用 Excel 2010、SPSS 23.0 软件进行数据分析，采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对侵蚀量的影响

秸秆覆盖条件下，经历 1 h 降雨后不同处理组合

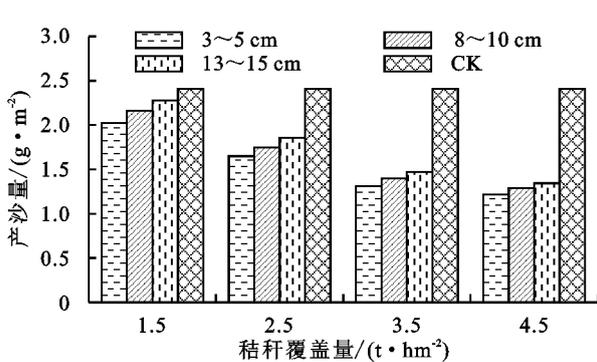
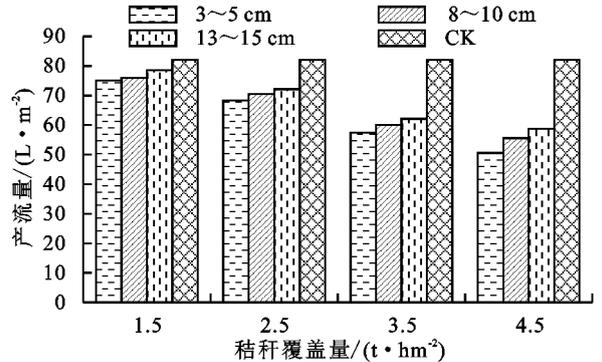


图 2 不同处理组合间坡面产沙产流量

相同覆盖量水平下，随秸秆长度增加，坡面产流量、产沙量增加，但通过方差分析发现，不同覆盖量水平下产流、产沙量增加程度不同。当覆盖量为 1.5 t/hm² 时，随秸秆长度增加，产流量呈极显著差异 ($p < 0.01$)，而在 2.5~4.5 t/hm² 时随秸秆长度增加产流量差异显著 ($p < 0.05$)；产沙量在 1.5~3.5 t/hm² 时随秸秆长度的增加无明显差异，但在 4.5 t/hm² 条件下随秸秆长度增加，产沙量呈极显著差异 ($p < 0.01$)。考虑秸秆覆盖量对结果差异性的影响，为明确覆盖量和秸秆长度对坡面产流、产沙量作用程度的大小，揭示产沙产流条件下秸秆长度与覆盖量的依赖关系，对秸秆长度和覆盖量进行交互作用分析。

交互作用分析(图 3)结果表明，秸秆长度对坡面产流量和产沙量的影响程度依赖于秸秆覆盖量。伴随秸秆长度改变，不同覆盖量之间产流量的斜率差异明显，证明秸秆长度对坡面产流的影响更大。这是由于秸秆长度增加，Darcy—Weisbach 阻力系数及曼宁糙率系数随之降低^[18]，减少了水流阻力导致单位时间内径流量变大，而覆盖量增至 4.5 t/hm² 时，高密度的覆盖一定程度上填补了秸秆间的空隙，削弱了秸秆长度对坡面产流量的影响。雨滴打击作用使地表出

间的坡面总产沙量、产流量见图 2。由图 2 可知，在试验条件下，秸秆覆盖坡面的产流量与产沙量较裸露坡面差异极显著。与裸露坡面相比，秸秆覆盖条件下坡面产流量平均减少 19.5% ($p < 0.01$)，产沙量减少 31.6% ($p < 0.01$)。相同秸秆长度下，与裸坡相比，随秸秆覆盖量的增加，坡面产流量、产沙量极显著下降 ($p < 0.01$)；以 13~15 cm 秸秆为例，当覆盖量由 1.5 t/hm² 增加至 4.5 t/hm² 时，产流量由 78.65 L/m² 降为 58.78 L/m²，产沙量由 2.28 g/m² 下降至 1.34 g/m²。这是由于秸秆覆盖能拦截坡面径流过程中的水和泥沙，水分渗透入秸秆层从而减少达到土表的水分。增加覆盖量使单位面积内秸秆个体数量增多，增强了秸秆的持水能力使产流量降低；另一方面其减少了裸土面积，显著降低雨滴击溅地面产生的动能，从而减少细小土粒和坡面细沟的生成，使坡面的侵蚀量降低。



现洼地和物理结皮，在覆盖量为 1.5 t/hm² 时，产流量和产沙量有较高初始值，裸土面积较大，地表粗糙度较低是产沙量较大的主要原因，因此覆盖量成为限制产沙量的主要因素；但随着覆盖量增加至 4.5 t/hm²，裸露孔隙减少，秸秆持水量显著增大，同等覆盖量下 13~15 cm 的秸秆由于有机质含量增加，不利于水分入渗和填注^[19]，对水流的阻滞作用最弱^[18]，使水流在短时间内汇集产生较大径流量，产沙量急剧增加，并高于其他秸秆长度下的产沙量。

进一步分析坡面产流量、产沙量与秸秆覆盖量和秸秆长度的关系，经过回归分析发现，产沙量 Y_s 和产流量 Y_L 与秸秆长度 S_L 、秸秆覆盖量 S_w 满足良好的线性关系，其关系式分别为 $Y_s = 0.018S_L - 0.302S_w + 2.394$ 和 $Y_L = 0.545S_L - 7.354S_w + 82.542$ ， R^2 分别为 0.962 和 0.977。

2.2 秸秆覆盖对坡面产沙产流过程影响

坡面产流产沙过程中，延缓初始产流时间能增加土壤入渗时长，减少细小土壤颗粒随水流流失的机率^[5]。不同秸秆覆盖条件下的坡面初始产流时间见表 1。裸坡的初始产流时间为 0.74 min，秸秆覆盖坡面的产流初始时间均滞后于裸地，且平均延迟 4.62 min。随秸秆覆盖量增加，初始产流时间出现波动，

最迟产流时间无明显规律。这与唐涛等^[10]得出的在特定坡度和雨强下,随秸秆覆盖率增大,初始产流时间推迟的结论不同,出现这一现象的原因可能是其只

研究了 0.1~0.5 t/hm²覆盖量下的坡面,且秸秆长度对坡面初始产流时间也有一定的影响;另外,土槽尺寸的不同也会对坡面产汇流过程产生影响。

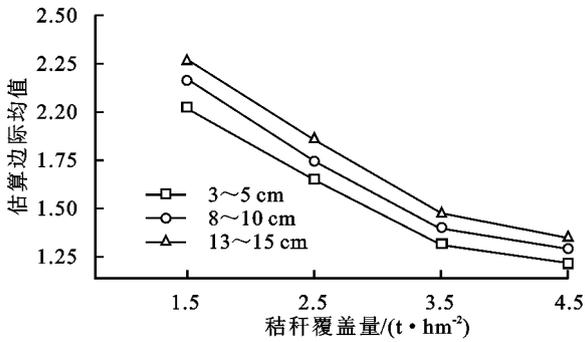


图 3 秸秆长度与覆盖量的产沙产流交互作用分析

表 1 不同覆盖条件下初始产流时间

单位: min

秸秆覆盖量/ (t·hm ⁻²)	3~5 cm	8~10 cm	13~15 cm
1.5	2.75	6.41	1.88
2.5	7.64	4.90	2.16
3.5	4.70	5.65	6.23
4.5	5.49	4.07	3.55
CK	—	0.74	—

2.2.1 秸秆覆盖量对坡面产流产沙过程的影响 不同秸秆覆盖量水平下的坡面产流产沙状况随时间变化过程(图 4),试验条件下,1.5,2.5 t/hm²覆盖量下的坡面产流过程与裸露坡面接近,在 30 min 前的径流强度均明显高于 3.5,4.5 t/hm²。对比不同覆盖量水平下的径流强度峰值和增幅发现,降雨前期覆盖量的变化引起径流强度差异显著,覆盖量增加能延缓产流强度峰值的出现,起到很好的减水作用。

急剧降低,究其原因可能是由于 12 min 时裸坡的侵蚀细沟数量达到稳定后向切沟侵蚀发展,在 25 min 时达到侵蚀基准面。30 min 前裸坡具有较大的增幅和增速,并且产沙峰值是秸秆覆盖条件下的近 2 倍,由于土壤在达到饱和状态时易受外力作用,雨滴打击破坏表层土壤结构,侵蚀过程极易由片蚀转向细沟侵蚀^[20],使土粒极易被径流搬运造成土壤侵蚀;同时击溅作用使土体崩解为更细小颗粒,堵塞土壤孔隙,降低土壤水分入渗^[21],加速裸露坡面的产流产沙过程。30 min 之后,裸坡和覆盖坡面产沙强度变化趋势相接近,此时土壤细沟数量达到稳定,产沙强度也趋于平稳^[22],秸秆覆盖较好地抑制了坡面侵蚀过程向切沟侵蚀发展,降雨结束时裸坡的产沙强度仍高于覆盖坡面。因此,秸秆覆盖措施可明显减少土壤侵蚀,对比不同覆盖量下的坡面产沙强度发现,当覆盖量为 1.5 t/hm²时,坡面的减沙效果在降雨初期不明显,而覆盖量为 4.5 t/hm²时坡面产沙强度随时间增加始终处于较低水平,减沙效果明显。

裸坡的产沙强度在 12 min 与秸秆覆盖坡面达到的稳定产沙强度接近,之后便急剧增加,至 25 min 后

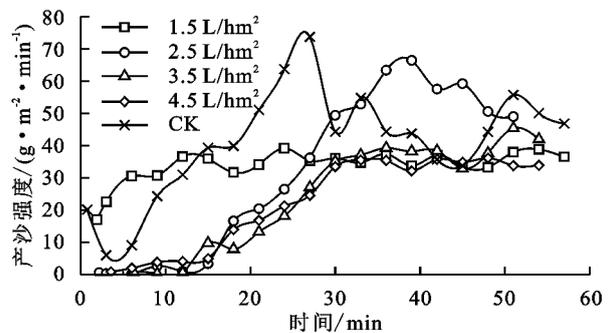
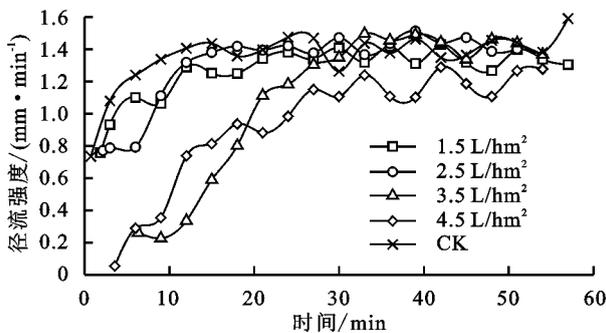


图 4 不同覆盖量下坡面产流产沙过程

2.2.2 秸秆长度对坡面产流产沙过程的影响 通过方差分析得出随时间增加坡面产流强度呈极显著差异($p < 0.01$),在 42 min 时不同秸秆长度下的坡面产流强度接近。有研究^[4]表明,坡面的承雨强度是影响坡面径流强度的另一因素,由图 5 可知,13~15 cm 秸秆覆盖在 4.5 t/hm²的覆盖度下秸秆之间空隙减少,形成相对平整的坡面使地表粗糙度减弱,因

而坡面在单位时间内汇集较大雨量,相比于 3~5 cm,8~10 cm 秸秆覆盖坡面的径流强度增强。同时,当秸秆长度由 3~5 cm 增加到 13~15 cm 时,径流系数由 0.82 增加至 0.95,究其原因可能是因为秸秆长度增加导致下垫面透水性减弱,从而径流系数易达到较高的稳定值^[17]。

降雨过程中不同秸秆长度条件下的坡面产沙强

度变化无明显规律(图 5), 秸秆长度增加对产沙强度并无显著影响, 33 min 前 8~10 cm 的秸秆产沙强度

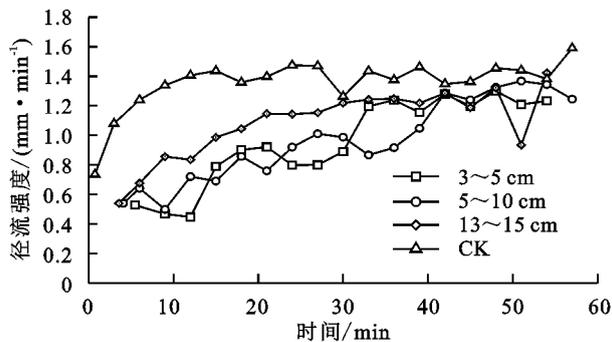


图 5 不同长度秸秆覆盖下的坡面产流产沙过程

2.3 秸秆覆盖坡面减水减沙效益

秸秆覆盖措施的水土保持效益定量计算是为科学布设水土保持措施提供依据, 而坡面的减水减沙效益是实施水土保持措施后坡面减少的径流量和产沙量相对于对照的百分比^[23]。不同秸秆覆盖条件下坡面的减水减沙效益结果(表 2)表明, 秸秆覆盖措施有较好的减水减沙效益, 秸秆覆盖条件下的平均减水效益为 20.28%, 平均减沙效益为 31.73%。随秸秆覆盖量由 1.5 t/hm² 增加至 4.5 t/hm², 其减水效益的增幅达到 26.28%, 减沙效益增幅为 36.18%。由此表明, 增加秸秆覆盖量, 水土保持效益呈极显著增加 ($p < 0.01$), 当覆盖量为 2.5~4.5 t/hm² 时, 减水效益的增幅达到最大。而减水效益和减沙效益随秸秆长度增加而降低, 但差异不显著。由于减少秸秆长度、增加秸秆覆盖量使单位面积内秸秆的堆叠方式显著

表 2 不同覆盖条件下坡面减水减沙效益

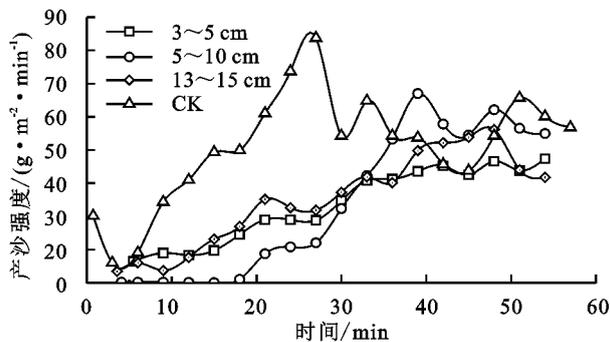
单位: %

减水减沙效益	秸秆覆盖量				秸秆长度		
	1.5 t/hm ²	2.5 t/hm ²	3.5 t/hm ²	4.5 t/hm ²	3~5 cm	8~10 cm	13~15 cm
RRE	6.73	14.29	27.11	33.01	23.42	20.18	17.26
SLRE	10.61	27.34	42.18	46.80	35.67	31.56	27.97

3 讨论

秸秆覆盖措施能明显降低单位面积坡面侵蚀量, 具有良好的水土保持效益^[24-25], 不同长度的秸秆在各覆盖量水平下的土壤侵蚀特征不同。90 mm/h 降雨条件下, 随秸秆覆盖量增加, 坡面产流量、产沙量显著减少, 这与王安^[26]、唐涛等^[10]得出的结论相同。秸秆覆盖量影响坡面产流、产沙全过程, 在降雨前期对坡面的减水减沙作用尤其明显, 通过减少雨滴打击能量, 延迟地表径流的产生以及保护土壤的良好结构有效地抑制了土壤由细沟侵蚀向切沟侵蚀发展。而秸秆长度增加导致坡面水动力学特征显著变化^[18, 27], 秸秆长度对坡面的产流量影响较大, 对 4.5 t/hm² 覆盖量下的产沙量作用较大。究其原因是由于低覆盖量水平下, 裸露土壤面积较大, 增加秸秆长度则减少了单位面积内的秸秆数量导致减沙作用不显著, 但秸

最小, 而 33 min 后不同秸秆长度下的产沙趋势改变, 3~5 cm 秸秆覆盖坡面产沙强度处于最低水平。



变化, 不同秸秆个体相互交错形成“骨架”, 从而增加了微地形的复杂性和空间的异质性, 径流泥沙在通过这些微观构架时被有效拦截, 径流泥沙量随之显著减少。此外, 秸秆的排列方式如横坡、顺坡对产流产沙也有影响, 秸秆破碎打乱了排列, 秸秆越短排列会越杂乱, 从而有效拦截径流和泥沙。因此, 在水土保持耕作措施之上, 合理设计秸秆长度和覆盖量能达到理想的水土保持效益。经回归分析, RRE(%) 和 SLRE(%) 与 S_L 、 S_w 的关系为:

$$RRE(\%) = -0.616S_L + 9.166S_w - 1.668$$

$$R^2 = 0.968$$

$$SLRE(\%) = -0.769S_L + 12.34S_w + 1.637$$

$$R^2 = 0.945$$

秸秆覆盖量 S_w 和秸秆长度 S_L 与 RRE(%)、SLRE(%) 满足较好的线性关系。

秆长度增加, 径流流经途中介质的差异和所受阻力减少使得流速增加, 单位时间内产流量激增。高覆盖量水平下, 3~5 cm 秸秆通过增加地表粗糙度增加了填洼^[28], 从而起到很好的阻流阻沙作用, 使不同秸秆长度下的产沙量有极显著差异。然而, 采用截断处理的方式, 可能会改变秸秆的性质。徐锡蒙等^[29]研究认为, 秸秆覆盖能够减少坡面径流量和侵蚀量的根本原因是覆盖措施通过调控坡面径流, 改变了坡面水沙输出过程, 通过整株覆盖沟头加上秸秆段填充沟道的方式能使坡面侵蚀量削减率达 46.2%, 而本研究最大侵蚀削减率为 46.8%。

不同覆盖量、不同秸秆长度覆盖坡面的产流产沙过程表明, 无覆盖坡面在降雨初期产沙强度急剧增大, 覆盖坡面的平均初始产流时间较裸坡推迟 6.23 倍, 秸秆覆盖措施有效抑制坡面产沙强度急剧变化幅

度、延缓沙峰的出现,这与张翼夫等^[5]的观点一致。就产流方面,13~15 cm 秸秆的产流强度明显高于其他水平,究其原因是因为3~5 cm 秸秆容易随坡面径流搬运,聚集后形成微型坝^[30],使地表高低起伏,通过降低地表流速,相对延长了土壤的入渗时长;当坡面产生细沟时,3~5 cm 秸秆随细沟流进入土体内部,穿插固着于土体中,与土壤形成复合体从而减少土壤侵蚀。降雨过程中,径流量的变化影响土壤侵蚀过程,而泥沙的搬移淤积同样影响水的流失。因此,秸秆长度和覆盖量是覆盖措施中影响坡面产流产沙量的主要因素。

本研究发现,秸秆覆盖措施的减沙效益相较于减水效益更为显著,这与车明轩等^[11]观点一致。在当前试验条件下,3~5 cm 秸秆在4.5 t/hm²覆盖条件下有良好的减水减沙效益。然而,因为本试验秸秆长度和秸秆量水平设计在一定范围内,更高水平覆盖量以及秸秆长度下所对应的土壤产流产沙特征还需进一步探究。秸秆粉碎还田实现了资源的可持续利用,改良土壤理化性质,具有较好的水土保持效益。相对于未截断或未粉碎的秸秆,短秸秆更易与表层土壤紧密结合,形成更为复杂的空间结构,拦截阻滞径流泥沙的能力更强;但是人工粉碎秸秆消耗人力物力成本,而秸秆覆盖也并不是越多越好^[31],如何在秸秆覆盖发挥水土保持效益与成本消耗之间找到平衡是值得商榷的问题,需要进一步研究。

4 结论

(1)不同条件下的秸秆覆盖坡面较裸坡的产流量、产沙量均减少;随秸秆长度增加,坡面产流量显著增加,产沙量在覆盖量为1.5~3.5 t/hm²时随长度增加无显著差异,而在4.5 t/hm²覆盖量下极显著增加;随秸秆覆盖量增加,坡面产流量、产沙量极显著减小。

(2)秸秆覆盖坡面较裸坡的初始产流时间增加6.23倍,各试验条件下坡面产流和产沙强度总体低于无覆盖坡面。秸秆覆盖使土壤保有良好结构,有效抑制坡面侵蚀过程由细沟向切沟发展,2.5~4.5 t/hm²覆盖量下的起始产沙强度和最终稳定产沙强度显著低于裸坡,不同覆盖量水平下的坡面产流产沙过程在30 min左右趋于峰值并达到稳定。秸秆长为13~15 cm时,坡面的产流强度在降雨过程中高于其他秸秆长度水平。

(3)随覆盖量增加,减水减沙效益呈线性增加。随秸秆长度增加,秸秆覆盖措施的水土保持效益呈线性减小;当前试验条件下,3~5 cm 秸秆在覆盖量为4.5 t/hm²时具有最优减水减沙效益。

参考文献:

[1] 曹雪.黄土高原坡耕地不同耕作措施水土保持效应研究

[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.

- [2] Ro E, Ouyang Z Y, Yu X X, et al. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China[J]. *Geomorphology*, 2014, 207(7): 64-70.
- [3] 欧阳铨人,吴伯志.水土保持耕作措施的研究进展及展望[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(4): 718-726.
- [4] 唐辉,李占斌,李鹏,等.黄土坡面产流产沙过程及微地形变化特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1708-1712.
- [5] 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.
- [6] Christensen B T. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(4): 429-435.
- [7] Adélia N N, António C de A, Celeste O A C. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 687-699.
- [8] Egle J D, Moore T D. Effect of rainfall energy on infiltration into a bare soils [J]. *Transactions of ASAE*, 1983, 26(6): 189-199.
- [9] Pan C, Shangguan Z, Lei T. Influences of grass and moss on runoff and sediment yield on sloped loess surfaces under simulated rainfall[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(18): 3815-3824.
- [10] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. *水土保持研究*, 2008, 14(1): 9-11, 40.
- [11] 车明轩,宫渊波, Muhammad N, K, 等.不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 131-135, 142.
- [12] 刘柳松,任红艳,史学正,等.秸秆覆盖对不同初始含水量土壤产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 108-112.
- [13] 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.
- [14] 赵牡丹,汤国安,陈正江,等.黄土丘陵沟壑区不同坡度分级系统及地面坡谱对比[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(4): 33-36.
- [15] 张科利,细山田健三.坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J]. *地理科学*, 1998, 18(6): 561-566.
- [16] 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.
- [17] 武晟,汪志荣,张建丰,等.不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(5): 55-59.
- [18] 李朝栋,李占斌,马波,等.不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 153-160.
- [19] 吕岩,仵磊,徐燕,等.有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(4): 655-660.

- 究[J].科技通报,2018,34(8):218-223,254.
- [8] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
- [9] 吴媛媛,杨明义,张风宝,等.添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J].土壤学报,2016,53(1):81-92.
- [10] 赵联芳,次仁吉保,王成,等.强降雨下果园除草对径流中颗粒物及营养盐的影响[J].水资源保护,2019,35(3):57-62.
- [11] 成玉婷.冻融作用下坡面水沙与氮磷迁移过程及其响应机制研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [12] 孙佳美,樊登星,梁洪儒,等.黑麦草调控坡面水沙输出过程研究[J].水土保持学报,2014,28(2):36-39,44.
- [13] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):136-142.
- [14] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- [15] 韩赛奇.黄土丘陵沟壑区高度治理流域对极端暴雨的水文响应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [16] 高敏,牛青霞,王茹,等.人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地侵蚀泥沙变化特征研究[J].水土保持学报,2011,25(2):19-23.
- [17] 朱波,汪涛,祝福虹,等.紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J].环境科学学报,2008,28(3):525-533.
- [18] 杨大明,高佩玲,刘小媛,等.坡面薄层水流流速研究[J].水土保持学报,2019,33(4):72-80.
- [19] 刘钦.纸坊沟流域暴雨侵蚀与坡面人工降雨产流产沙试验研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [20] 李叶鑫,吕刚,傅昕阳,等.降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):37-43.
- [21] 黄俊,赵西宁,吴普特.基于通径分析和灰色关联理论的坡面产流产沙影响因子分析[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):64-70.
- [22] 刘月娇.不同降雨强度和纱网覆盖下紫色土坡耕地水土流失与养分输出特征[D].重庆:西南大学,2016.
- [23] Guo X X, Liu H T, Zhang J. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: A review[J].Waste Management,2020,102:884-899.
- [24] Rondon M A, Lehmann J, Juan R, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions[J].Biology and Fertility of Soils,2007,43(6):699-708.
- [25] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.
- [26] 侯春霞,骆东奇,谢德体,等.不同利用方式对紫色土团聚体形成的影响[J].西南农业大学学报(自然科学版),2003(5):467-470.
- [27] 许云翔,何莉莉,刘玉学,等.施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1110-1118.
- [28] 李文娟,颜永毫,郑纪勇,等.生物炭对黄土高原不同质地土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 迁移特征的影响[J].水土保持研究,2013,20(5):60-63,68.

(上接第103页)

- [20] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.
- [21] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005(2):97-101.
- [22] 郑粉莉,高学田.黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M].西安:陕西人民出版社,2000:4-85.
- [23] 袁希平,雷廷武.水土保持措施及其减水减沙效益分析[J].农业工程学报,2004,20(2):296-300.
- [24] Gholami L, Sadeghi S H, Homaee M. 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.
- [25] Yonghui B, Xuan Z, Ruibo Z, et al. Effects of straw mulching on soil erosion benefits and runoff shear force under simulated rainfall[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(6):94-99.
- [26] 王安.人工降雨条件下保护性耕作的水土保持效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [27] 王俊杰,张宽地,龚家国,等.不同覆盖度条件坡面水流阻力规律[J].水土保持学报,2015,29(5):1-6.
- [28] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.
- [29] 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.
- [30] Whelan M J, Anderson J M. Modelling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale[J].Journal of Hydrology,1996,186(1/4):335-354.
- [31] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J].农业工程学报,2011,27(增刊1):238-243.