

不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性

李朝栋^{1,2}, 李占斌¹, 马建业¹, 马波^{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. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 为了系统研究秸秆长度对坡面流水动力学特性的影响, 利用室内人工模拟冲刷定床阻力试验, 在 4 个坡度、5 个流量条件下分别对 3~5、8~10 和 13~15 cm 长度秸秆覆盖坡面流水动力学参数变化特征进行分析, 阐明不同长度秸秆覆盖坡面水流阻力与雷诺数的关系。结果表明, 秸秆长度对坡面流水动力学参数影响显著。不同长度秸秆覆盖条件下, 坡面流雷诺数变化范围为 166~558, 当流量 ≤ 7.5 L/min 时, 坡面流态为层缓流; 流量为 9.0 L/min 时, 坡面流态为过渡缓流。秸秆覆盖条件下, 坡面流具有较小的流速和较大的水深、Darcy-Weisbach 阻力系数及曼宁糙率系数。随着秸秆长度增加, 坡面流流速随之增加, 而水深、Darcy-Weisbach 阻力系数及曼宁糙率系数随之降低。随着秸秆长度和水力坡度增加, 流态指数值总体呈现降低趋势。当秸秆长度由 3~5 cm 增加至 13~15 cm 时, 流态指数平均由 0.716 降至 0.501。研究可为秸秆覆盖条件下水土流失防控机理研究提供科学依据。

关键词: 流型; 水动力学; 秸秆; 坡面流; 定床试验; 黄土耕地

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.022

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-04-0153-08

李朝栋, 李占斌, 马建业, 马波. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.022 <http://www.tcsae.org>

Li Chaodong, Li Zhanbin, Ma Jianye, Ma Bo. Hydraulic characteristic of overland flow on loess farmland slope under mulch with different wheat straw lengths[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 153 - 160. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.022 <http://www.tcsae.org>

0 引言

在活动频繁的坡耕地上, 由坡面径流造成的土壤侵蚀已成为一个严重的问题。中国坡耕地水土流失量占该区域总流失量的比例大部分均高于 60%, 坡耕地土壤侵蚀已成为中国生态环境建设和可持续发展的首要问题之一^[1]。秸秆覆盖是中国重要的保护性耕作措施之一, 对减少坡面土壤侵蚀具有积极的作用。目前针对秸秆覆盖的研究主要集中于秸秆还田的土壤水肥效应和防蚀效益等方面, 对其侵蚀动力机制研究较少^[2-8]。秸秆覆盖不仅有效拦截消耗降雨动能、降低击溅侵蚀、减少土壤颗粒分离与扩散, 还可有效增加地表糙率 and 水分入渗, 从而对减少径流、降低流速、降低对土壤的冲刷作用产生积极作用; 与此同时, 秸秆在降雨过程中形成低洼蓄水促使泥沙沉积, 可有效减少土壤侵蚀^[9]。秸秆覆盖作为保护性耕作的一种典型措施, 当其地表秸秆覆盖为 30% 时便可达到减少农田土壤风蚀或水蚀等目的^[10]。秸秆覆盖能

显著减少地表径流 73.9%~86.2%, 但增加壤中流 15.4%~156.4%, 使径流总量降低 32.5%~66.6%, 并极显著降低土壤侵蚀总量 96.4%~98.1%^[11]。杨青森等^[2]对黑土区的秸秆覆盖研究认为, 秸秆覆盖可有效减少坡面土壤侵蚀, 秸秆覆盖量为 2 kg/m² 时, 坡面径流量减少 87%, 侵蚀量相应减少 99.86%; 而秸秆覆盖量为 4 kg/m² 时, 坡面几乎不产生侵蚀。但秸秆覆盖对土壤侵蚀的作用受秸秆量影响较大, 研究认为, 当秸秆覆盖率>40% 时能有效地控制水土流失, 但当秸秆覆盖率<40% 时作用不明显^[9]。

秸秆覆盖不仅对降雨有截留持水作用, 而且对降雨侵蚀能量的削减和在地表的分布产生复杂的影响, 进而有可能对坡面侵蚀及细沟发育产生影响。裸露坡面细沟流侵蚀力与其水力学参数关系密切, 不同的径流系数可以用来衡量细沟流侵蚀力; 但是当坡面存在作物秸秆时, 在裸露地表上得出的各种物理参数关系均无法得到较好应用^[10,12]。坡面流是由降雨形成并沿坡面流动的浅层水流, 相比较明水流, 坡面流底坡陡, 水深浅, 受坡度、雨强和地表状况等多种因素影响, 这使得坡面流的研究较为困难^[13]。目前, 对坡面流水动力学特征的研究主要集中于裸露坡面上, 针对植被、枯落物和秸秆覆盖等地表覆盖措施的坡面水动力学特征的研究较为少见。不同的覆盖, 在降低坡面土壤流失量的同时, 还可显著改变地表径流水力学特性, 例如, 植被残留物、秸秆和碎石等覆盖对降低流速均有显著效果^[10]。由于秸秆覆盖和土

收稿日期: 2016-04-15 修订日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(41401309、41330858); 西北农林科技大学博士科研启动基金(2452015345)

作者简介: 李朝栋, 男, 陕西千阳人, 主要从事黄土高原土壤侵蚀试验研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: soilcrop@163.com
*通信作者: 马波, 男, 陕西西乡人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: mabo_916@126.com

壤紧密接触,尤其是浅耕半固定混合式覆盖,强烈地改变了土壤表面粗糙度,因此对地表水力学参数影响很大。而在细沟侵蚀方面作物秸秆对细沟流水力学特性和侵蚀力影响程度的计算方法与当前对细沟流水力学特性及其和细沟形态间关系的研究结果并不相符^[10]。Foster等^[14]曾指出,在土中混入秸秆可有效防止细沟向下深切,且表土中秸秆与土壤结合越紧密对细沟的影响更甚,当混入土中的秸秆由于径流冲刷暴露在外,可降低土壤的剪应力。由此可见,秸秆覆盖条件下侵蚀动力及水动力学特性与裸坡条件下存在诸多差异,难点和疑问也较多。本文通过室内秸秆覆盖人工模拟径流冲刷定床阻力试验,对不同长度秸秆覆盖下的坡面流水动力学特性进行系统研究,以期阐明秸秆覆盖条件下坡面流水动力学参数的变化特征,为秸秆覆盖条件下水土流失阻控机理研究提供科学依据。

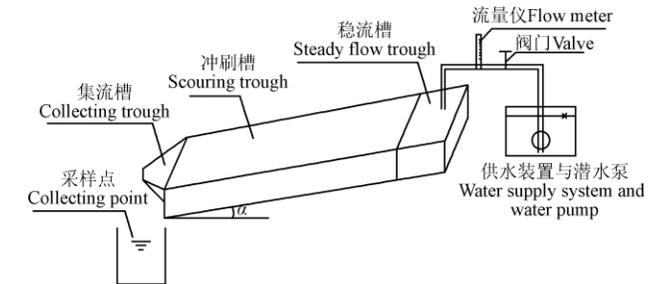
1 材料与方方法

1.1 试验方法

本研究在西北农林科技大学水土保持工程实验室进行(34°14'~34°20'N, 107°59'~108°08'E),试验采用人工模拟径流冲刷法。供试秸秆为当年自然晒干的小麦秸秆,于2015年5月底人工收割而得,再根据当地秸秆还田典型长度并适当分级,利用铡刀裁剪成3~5、8~10和13~15 cm共3种试验所需的秸秆长度,坡面秸秆覆盖量为3.5 t/hm²。本试验采用定床阻力试验,如此既可以模拟天然地表糙度,又可以消除床面形态变化、底沙交换对水流紊动的影响^[15]。人工模拟径流冲刷定床阻力试验坡度依据黄土区坡耕地典型坡度设为3°、5°、10°和15°;试验设计放水流量依据黄土高原地区侵蚀性降雨范围并考虑秸秆抵抗流水冲刷产生漂移的承受能力,最终将放水流量设计为3.0、4.5、6.0、7.5和9.0 L/min。3种长度秸秆覆盖坡面及裸坡在不同坡度和流量下分别进行试验,重复测量3次,共计240个处理。

试验装置(图1)由供水水泵、流量计、稳流槽和冲刷槽等构成,其中冲刷槽采用变坡式钢板水槽,结构尺寸长2 m、宽0.3 m、深0.3 m,其中填土深度为0.25 m,坡度可在0°~15°范围内任意调节。由于本试验采用定床阻力试验,故需将冲刷水槽进行填充压实并固化床面,采用当地的土壤(旱耕土垫人为土),将土壤自然风干后过5 mm筛,填土设计容重约为1.3 g/cm³,可以代表黄土高原坡耕地土壤自然状态。填土过程采取分层填土、分层压实的方法,每层填土深度为5 cm,共计填土5层。将试验土槽调至水平。为了使土槽内土地自然沉降,便于下一步的固化床面。在20 mm/h降雨强度对土槽进行前期降雨约1 h,使水分充分入渗,将其土壤自然沉降压实,也可消除人为装填土壤的松散状况,此后再将沉降的部分填至水平。将处理好的土槽进行自然风干,然后利用喷漆枪将清漆均匀地喷洒并完全覆盖在土槽表面以固化床面。将直径为2~5 mm的土壤颗粒均匀地洒在喷洒过清漆的土槽表面,再次喷洒清漆,使其包裹住表面

的土壤颗粒。将土壤颗粒粘于坡面土壤表面,可在床面形成稳定的糙率,且在试验中水流无法改变坡面糙率;这样模拟天然土壤地表糙率,不仅可消除下垫面糙率变化对水流阻力等的影响^[16],又可防止床面过于光滑导致覆盖在上面的秸秆沿水流方向移动。



注: α 为坡度, (°)。 Note: α is slope gradient, (°).

图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

试验开始前调整坡度和放水流量,流量大小由流量计和阀门控制,用称质量法对所需流量进行率定。将剪裁好的秸秆在水中浸泡12 h,使其充分吸水,以防止其随水流漂浮移动,同时还防止其吸水影响水槽出口流量。浸泡好的秸秆将其沥干。将冲刷槽调整至水平,在距离床面30 cm高度处,双手将秸秆扬起使其自然坠落于床面,覆盖层内保持秸秆交错纵横的随机位置。铺撒完毕后人工调整床面不同位置的秸秆,使其能够均匀分布于冲刷槽表面,并形成均匀厚度的秸秆覆盖。3~5 cm长的秸秆坡面厚度约为1.5 cm,13~15 cm长的秸秆由于其秸秆较长,秸秆层空隙较大,其厚度约为2.5 cm。试验按水流方向设3个断面,断面间距为0.6 m,距冲刷槽顶端0.1 m处为第1观测断面,依次为第2和第3观测断面,每个观测断面按横向方向分左、中、右采用常规高锰酸钾染色法测得流速。试验的同时将水银温度计(精度0.1 °C)放置于稳流槽内测定水流温度,以计算雷诺数。

1.2 水动力学参数计算方法

利用冲刷槽3个断面多次观测的表面流速,求取平均值后乘以修正系数0.75,得到水流断面平均流速^[17]。文中涉及的水深(h)、雷诺数(Re)、佛汝德数(Fr)、运动黏滞力系数(γ)、Darcy-Weisbach阻力系数(f)、曼宁糙率系数(n)的计算公式如下

$$h=q/v \quad (1)$$

$$Re=vR/\gamma \quad (2)$$

$$\gamma=0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2) \quad (3)$$

$$Fr=v/(g \cdot h)^{0.5} \quad (4)$$

$$f=8g \cdot R \cdot J/v^2 \quad (5)$$

$$n=v^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (6)$$

式中 h 为水深, m; q 为单宽流量, L/(m·s); v 为断面流速, m/s; R 为水力半径, m,其取值可近似等于水深 h , m; γ 为运动黏滞系数, m²/s; t 为水温, °C; f 为Darcy-Weisbach阻力系数; g 为重力加速度,取9.81 m/s²; J 为水力坡度,其值为坡度的正弦值,即 $J=\sin\alpha$, α 为坡度, (°); n 为曼宁糙率系数; ρ 为水流容重, 10 kN/m³。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖坡面流流态及流型

水流流态是坡面薄层径流水力学特征的基本表征参数之一，判别方法一般采用雷诺数；雷诺数是衡量水流紊动程度的重要指标，其值为水流惯性力与黏滞力之比^[18-19]。根据明渠均匀流的基本理论，当雷诺数小于 500 时，水流属于层流；当雷诺数大于 2 000 时，水流属于紊流；介于二者之间为过渡流。当水流呈层流时，黏滞力的作用大于惯性力，黏滞力对液流质点的运动起抑制作用；反之，水流呈紊流时，惯性力作用大于黏滞力，惯性力对液流质点的运动起推动作用^[19]。一般而言，在流量恒定的条件下，雷诺数 Re 越大，坡面流的紊动性越大，水流剥蚀以及挟沙能力也越强^[18]。此外，水流流态也可用佛汝德数进行表征，它反映了流速和径流深的对比关系。在定流量条件下， Fr 越大，表明径流挟沙能力越强、坡面径流剪切力越大。依据明渠流的判别标准，佛汝德数 $Fr \geq 1$ ，坡面流态为急流， $Fr < 1$ 则为缓流^[17]。本研究特定试验条件下，通过雷诺数和佛汝德数来判别水流流态与流型。不同长度秸秆覆盖条件下坡面流流态流型相关参数如表 1 所示。

表 1 不同流量和秸秆长度条件下水流流态流型相关水力参数
Table 1 Hydraulic properties of flow state and pattern of shallow flow under different straw lengths and flow rates

秸秆长度 Straw length/cm	流量 Flow rate/ (L·min ⁻¹)	雷诺数 Reynolds number	流态 Flow state	佛汝德数 Froude number	流型 Flow pattern
0 (无秸秆 No straw, CK)	3.0	134a	层流	1.050f	急流
	4.5	255g	层流	2.451i	急流
	6.0	339j	层流	1.749g	急流
	7.5	427m	层流	2.697j	急流
	9.0	558q	过渡流	1.946h	急流
3~5	3.0	170c	层流	0.412a	缓流
	4.5	242e	层流	0.540cd	缓流
	6.0	332h	层流	0.376a	缓流
	7.5	462n	层流	0.422ab	缓流
	9.0	558q	过渡流	0.424ab	缓流
8~10	3.0	166b	层流	0.483bc	缓流
	4.5	249f	层流	0.572d	缓流
	6.0	333h	层流	0.437ab	缓流
	7.5	399k	层流	0.552d	缓流
	9.0	538o	过渡流	0.418ab	缓流
13~15	3.0	177d	层流	0.535cd	缓流
	4.5	251fg	层流	0.599d	缓流
	6.0	337i	层流	0.727e	缓流
	7.5	409l	层流	0.750e	缓流
	9.0	552p	过渡流	0.699e	缓流

注：均值为 4 个坡度下的平均值。采用邓肯检验，不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Values are mean of 4 slope gradients. Different letter means the significant difference among treatments by Duncan's test ($P < 0.05$).

由表 1 可知，在试验设定的流量和坡度范围内，秸秆覆盖坡面流雷诺数变化介于 166~558 之间，且在试验流量和坡度范围内变化可分为 2 个阶段。不同长度秸秆覆盖及裸坡坡面流在流量 ≤ 7.5 L/min 时，雷诺数均小于 500，其流态均为层流；当流量为 9.0 L/min 时，其流态则为过渡流。秸秆覆盖对雷诺数的影响较小，进而对流态

的影响也相应较小。与裸坡相比，当流量为 3.0 L/min 时，秸秆覆盖坡面流雷诺数较裸坡有较大提升，3~5、8~10 和 13~15 cm 长度条件下，雷诺数分别较裸坡增加了 27.41%、24.16%和 32.11% ($P < 0.000 1$)。而当流量 ≥ 4.5 L/min 时，同一流量条件下，秸秆覆盖对雷诺数主要表现为降低效应，但是降低幅度较小；最大降幅为 6.61% ($P < 0.05$ ，流量为 7.5 L/min，秸秆长度为 8~10 cm)。可以看到，当流量为 3.0 L/min 时，秸秆覆盖条件下坡面流雷诺数较裸坡增加了 24.16%~32.11% ($P < 0.000 1$)。在小流量情况下 (3.0 L/min) 使水深提升后基于最小能耗原理穿行于秸秆之间，增加了水流与粗糙单元接触和碰撞的概率；加之水深无法没过秸秆层，在水流表面与秸秆碰撞已形成壅浪和尾涡，进而增加了水流的紊动性^[20]，使之在相同流量条件下较裸坡具有较高的雷诺数。但随着流量增大 (≥ 4.5 L/min)，水深进一步增加，使大部分秸秆淹没于水流之下，减少了表面水流接触秸秆后增加紊动性的可能性；水体内部流速垂线分布也会趋于均匀，有利于降低雷诺数。相同秸秆长度下，雷诺数随流量增大呈现极显著增大 ($P < 0.000 1$)。

由流型的判定标准可知，在本研究试验范围内，裸露条件下，坡面流流型均为急流；而秸秆覆盖条件下，坡面流流型均表现为缓流。由于秸秆覆盖对水流形成较大的阻碍，流速减慢且水深加深，呈现出层缓流的状态 (其中流量为 9.0 L/min 时为过渡缓流)。

2.2 秸秆覆盖坡面流水深及平均流速

水深是坡面径流水动力学最基本的参数之一，其变化常受到微地形、覆被状况、降雨和其他外界扰动因素的影响，而本研究采用固定床面的方法，使坡面糙率保持稳定，水流中不含泥沙，不存在坡面微地形变化等问题，因而可准确测定坡面流水深。在本研究特定试验条件下，水深与单宽流量和坡度的关系如图 2 所示。

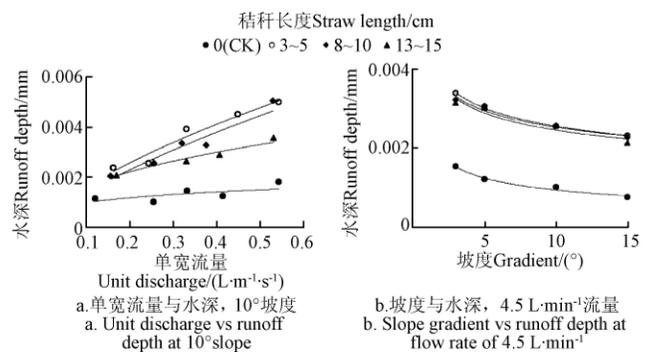


图 2 不同秸秆长度下坡面流水深

Fig.2 Runoff depth of overland flow under different straw lengths

秸秆覆盖条件下，坡面流水深较裸坡均有所增加 (图 2)。在当前试验坡度和流量范围内，秸秆覆盖较裸坡水深增加了 107.69%~178.64%，平均为 145.64% ($P < 0.000 1$)。秸秆长度对水深的影响较为显著，随秸秆长度增加，对水深的影响逐渐减弱，水深随之减小。相同坡度下，水深与流量呈正相关关系；而相同流量下，

随坡度增加, 平均水深呈减小趋势。同一秸秆长度覆盖条件下, 随着流量增大, 水深呈增加趋势; 随坡度增大, 水深呈减小趋势(图 2)。秸秆覆盖条件下, 随流量增加, 不同坡度间水深差异逐渐扩大; 随坡度增加, 不同流量间水深差异较小; 这种变化趋势在 3~5 cm 秸秆长度覆盖坡面表现最为显著, 即随着秸秆长度增加, 不同流量下的水深差异逐渐降低。

不同长度秸秆覆盖条件下断面流速与单宽流量和坡度的关系如图 3 所示。由图可知, 无论覆盖秸秆与否, 流速随流量和坡度的增加均呈现增加趋势。秸秆覆盖对流速具有显著的减缓作用, 与裸坡相比, 流速平均降低 55.54%, 其中 3~5、8~10 和 13~15 cm 3 种长度秸秆覆盖坡面流速分别较裸坡降低了 60.64%、57.67% 和 48.30% ($P<0.05$)。裸坡和秸秆覆盖坡面间流速差异随流量和坡度增大逐渐增大。

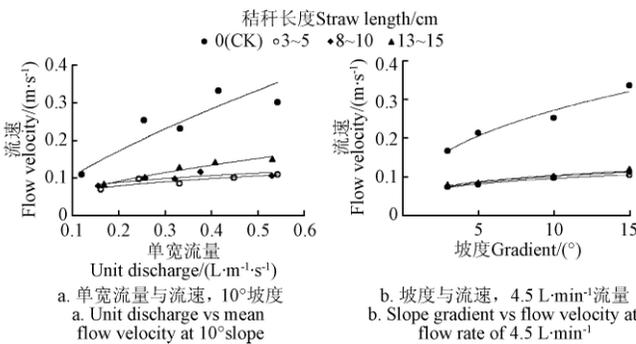


图 3 不同秸秆长度下坡面流流速
Fig.3 Flow velocity of overland flow under different straw length

江忠善等^[21]对国内外诸多学者的坡面流试验资料进行总结分析, 认为坡面流速是单宽流量与水力坡度的幂函数形式, 即 $v=K \cdot q^{\alpha} \cdot J^{\beta}$, 式中 K 、 α 、 β 均为系数, 经回归分析求得 α 为 0.5, β 为 0.35。本研究中裸坡和不同长度秸秆覆盖坡面平均流速与单宽流量和水力坡度的幂函数关系如下所示:

$$v=0.022 q^{0.363} \cdot J^{0.304} \quad R^2=0.72 \text{ (裸坡)} \quad (7)$$

$$v=0.165 L_{sm}^{0.209} \cdot q^{0.348} \cdot J^{0.295} \quad R^2=0.86 \text{ (秸秆覆盖)} \quad (8)$$

式中 L_{sm} 为平均秸秆长度, cm, 取不同秸秆长度范围之平均值分别为 4、9 和 14 cm。上式中流量和坡度的指数均略小于江忠善的 0.5 和 0.35^[21], 同时也略小于张光辉等^[16-17]的结果。

由于秸秆的存在, 加之水深较浅, 坡面流各点的流速并非一致, 而是基于最小能耗原理绕过秸秆并流动于秸秆之间, 因此在局部区域紊动性可能较强。Horton 假定坡面流是层流和紊流流态相互交错的混合流, 即在完全的湍流中间点缀有层流^[22]。基于此, 张宽地等^[20]基于流体力学理论推导出平均流速与单宽流量和水力坡度的关系 $v=r \cdot q^{1-m} \cdot J^k$, 式中 r 、 m 和 k 均为系数。其中断面平均流速与单宽流量的 $(1-m)$ 次方呈正比, 与水力坡度的 k 次方呈正比; 张宽地等将 m 定义为流态指数, 表征了单宽流量对流速的影响程度; 认为当 m 值较大时, 流体中能量的消耗主要以阻力做功为主, 当 m 值较小时, 流体主要通过增加流体流速进行能量转化, 阻力做功较弱^[20]。

不同长度秸秆覆盖条件下, 各水力坡度下拟合幂函数关系中流态指数 m 值如表 2 所示。

表 2 不同水力坡度下流态指数值
Table 2 Flow state index affected by hydraulic gradient

秸秆长度 Straw length/cm	水力坡度 Hydraulic gradient				平均 Average
	0.052	0.087	0.174	0.259	
0(CK)	0.507	0.408	0.265	0.280	0.365
3~5	0.774	0.750	0.674	0.664	0.716
8~10	0.726	0.760	0.733	0.727	0.737
13~15	0.611	0.516	0.434	0.441	0.501

由表 2 可知, 秸秆覆盖坡面流态指数 m 值均大于同等条件下的裸坡。随着秸秆长度增加到 15 cm 和水力坡度增加到 0.259, m 值总体呈现降低趋势。当秸秆长度由 3~5 cm 增加至 13~15 cm 时, 流态指数平均由 0.716 降至 0.501。当秸秆长度较短时, 单位面积上的秸秆个体小而更多, 内部交叉纵横结构更为复杂, 空隙更小, 对坡面覆盖的效果也更好, 从而使坡面阻力增强。湿周增大, 水流与秸秆个体接触的面积和频率增加, 水流各层之间的水体交换愈加频繁, 流速在垂线上的分布更加趋于均匀^[20]。在这种情况下, 阻力做功耗能处于上峰, 而流速增加转化能量处于次要因素, 水流紊动性减弱。

2.3 秸秆覆盖坡面流阻力

径流沿程运动必然会受到床面起伏变化和覆被物的阻滞作用, 水流所受阻力强弱可影响径流的流速, 进而影响径流的侵蚀力^[23]。由于床面为稳定糙率设计, 因此在水流阻力分析中可忽略床面沙粒、径流泥沙以及床面微地形改变等因素的影响, 但仍需要考虑秸秆覆盖对水流的阻碍作用。本研究采用 Darcy-Weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数来分析秸秆覆盖对坡面流阻力的影响。秸秆覆盖对 Darcy-Weisbach 阻力系数的影响见图 4。

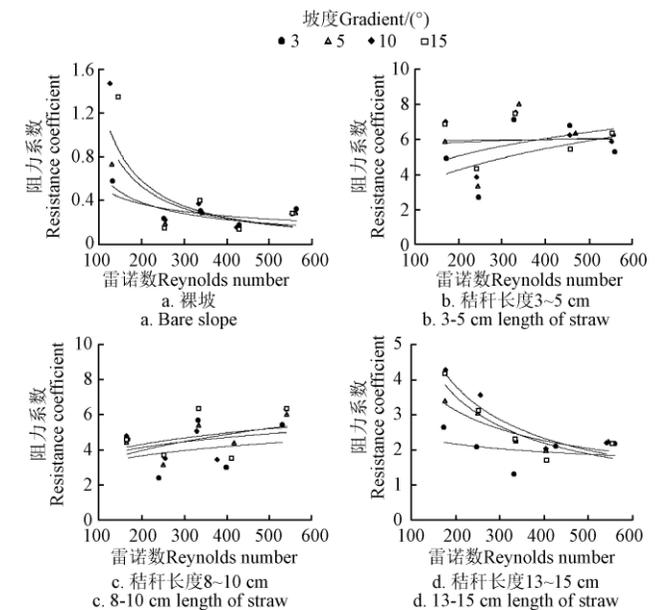


图 4 不同秸秆长度下坡面流阻力系数
Fig.4 Resistance coefficients of overland flow under different straw lengths

由图 4 可知，在试验设定的流量和坡度范围内，裸坡阻力系数的变化范围为 0.14~1.47，而在 3~5、8~10 和 13~15 cm 3 种长度秸秆覆盖坡面上的变化范围分别为 2.67~8.00、2.39~6.36 和 1.31~4.28，平均分别较裸坡增加了 20.89、15.69 和 8.17 倍 ($P<0.0001$)，由此说明秸秆覆盖对坡面流具有较强的阻碍作用。不同长度的秸秆，对水流的阻力作用差异较大，其中 3~5 cm 长度秸秆对水流的阻力最强，13~15 cm 则最弱。

丁文峰等^[23-24]的研究认为，Darcy-Weisbach 阻力系数与雷诺数之间也存在 $f=p_1 \cdot Re^{-p_2}$ 的幂函数关系，即阻力系数与雷诺数呈反比例关系。与其研究相似，秸秆覆盖条件下，阻力系数与雷诺数的关系均可用幂函数来描述。其中裸坡和 13~15 cm 长度秸秆覆盖条件下，幂函数指数为负值，即阻力系数与雷诺数成反比例关系；3~5 和 8~10 cm 长度秸秆覆盖条件下，指数为正值，即阻力系数与雷诺数呈正比例关系。说明在秸秆长度较小的情况下，阻力系数随雷诺数增大而呈增加趋势。

秸秆覆盖使坡面流阻力系数表现出较大的不确定性，这主要是由于径流冲刷使秸秆在坡面上重新分布和堆叠，造成局部分布不均，从而增加了阻力系数的不确定性。但是总体而言，秸秆覆盖对增加坡面流阻力系数是有积极作用的。由方差分析可知，秸秆长度、流量和坡度对阻力系数的影响均达到了极显著水平 ($P<0.0001$)。

曼宁糙率系数表征地表粗糙程度对水流流动过程中的阻滞作用。由图 5 所示，在试验设定的流量和坡度范围内，裸坡曼宁糙率系数的变化范围为 0.013~0.044，而在 3~5、8~10 和 13~15 cm 3 种长度秸秆覆盖坡面上的变化范围分别为 0.071~0.132、0.067~0.118 和 0.049~0.083，平均分别较裸坡增加了 4.38、3.64 和 2.33 倍 ($P<0.0001$)。

秸秆长度不同，对曼宁糙率系数的影响也有所不同。随着秸秆长度增加，对水流的阻滞作用逐渐减弱，曼宁糙率系数随之降低；其中 3~5 cm 长度处理下曼宁糙率系数是 8~10 cm 长度处理的 1.15 倍 ($P<0.0001$)，是 13~15 cm 长度处理的 1.61 倍 ($P<0.0001$)，这说明当秸秆较短时，对坡面水流的阻滞作用更加强烈。曼宁糙率系数与雷诺数的关系与阻力系数较为相似。裸坡坡面上，糙率系数随雷诺数增加而减小。秸秆覆盖坡面上，曼宁糙率系数随雷诺数增加而增加。由于短秸秆相对于长秸秆具有更多的秸秆个体数量，个体之间空隙较小、密度较大，在减少过水断面面积的同时又增加了水流的湿周，导致阻力变化较大；而长秸秆由于单位面积上个体数量较少，个体间空隙较大，对水流过水面的减少不及短秸秆，表现出较低的阻滞作用，这与王俊杰等在不同覆盖度下得出的结论较为相似^[25]。由方差分析可知，秸秆长度、流量和坡度对曼宁糙率系数的影响均达到了极显著水平 ($P<0.0001$)。

3 讨 论

秸秆覆盖是重要的水土保持措施，其不仅能拦截消耗降雨动能、降低溅蚀，还能有效减少坡面产流产沙。本研究通过对不同秸秆长度条件下坡面流水动力学特性的研究，通过水动力学参数的变化特征来阐述和解释秸秆覆盖对土壤侵蚀阻控动力机制问题。秸秆覆盖是重要的水土保持措施，不仅能拦截降雨动能、降低溅蚀，又可有效减少坡面产流产沙。作为地表覆被的一种类型，其水动力学特性与植被覆盖措施具有诸多相似之处。当地表覆盖有秸秆时，水流内部原有结构产生较大变化，增加了水流阻力，不仅能有效拦截阻滞径流和泥沙，还影响了坡面的产汇流过程，这与植被覆盖条件下是相似的^[20]。

目前，有关坡面流水动力学特性的研究主要是在裸露坡面上开展的，针对地表覆盖坡面水动力学特性的研究还相对较少。由于地表覆盖差异较大，开展此类研究亦相对较为困难，目前主要集中于植被覆盖坡面的水动力学特性研究，且分歧较大。其中就流态而言，一般认为植被覆盖条件下，坡面流流态为层缓流，随流量增加逐渐转变为过渡缓流，并不排除随流量进一步增大转变为紊流的可能^[20,26-30]。本研究虽以秸秆覆盖为主，但是不同长度秸秆覆盖条件下，坡面流流态变化规律与植被覆盖坡面较为一致，均为随流量增加，坡面流由层缓流逐渐转变为过渡缓流。张宽地等^[20]研究认为，植被覆盖条件下，当雷诺数 <500 时，水流流态不同于传统意义上的层流。由于植被阻挡，水流基于最小能耗原理绕行于植被之间，并在迎水面行程壅浪，在背水面产生尾涡，故将植被覆盖条件下的层流定义为“虚拟层流”。而在本研究中，由于秸秆相对植被覆盖度更高，秸秆内部又交错纵横穿插，对水流的穿梭绕行影响更大。因此，在试验过程中不仅可以观测到水流穿行于秸秆个体之间，还能观测到表面水流越过秸秆上方流动，同样产生了壅浪

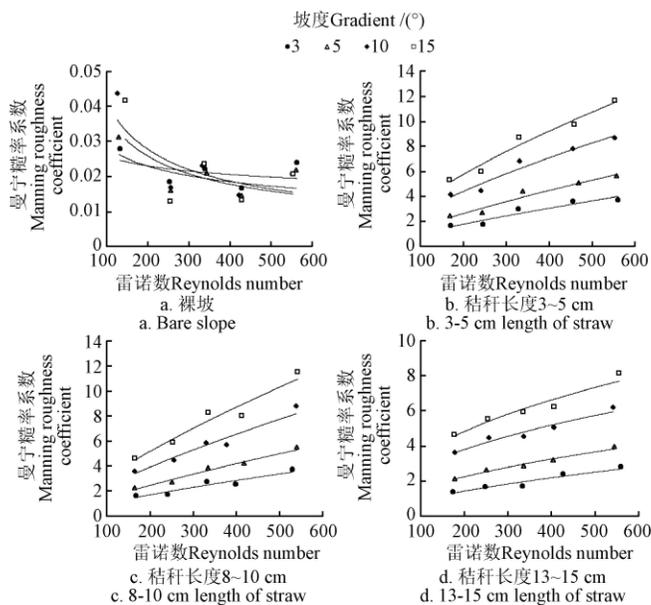


图 5 不同秸秆长度下坡面流曼宁糙率系数

Fig.5 Manning roughness coefficients of overland flow under different straw lengths

和尾涡。这与张宽地等在植被覆盖条件下所观察到的现象相似而又有所不同。因此, 秸秆覆盖条件下, 不论秸秆长度如何变化, 其层流也可认为是区别于传统层流意义上的“虚拟层流”。

坡面流是坡面土壤侵蚀发生发展的重要原因, 而坡面流的侵蚀力主要由流速决定。作为水土保持重要措施之一的秸秆覆盖, 能够有效减缓坡面流流速, 这对防止坡面水土流失具有重要的意义。而秸秆覆盖坡面流流速减缓主要体现在坡面阻力的增加上。一般认为, 坡面流阻力由颗粒阻力、波阻力、形态阻力和降雨阻力 4 部分构成。由于本研究采用定床阻力试验方法, 故可忽略降雨阻力的影响。由于波阻力是坡面流受地表障碍物阻挡而产生的阻力, 因此在秸秆覆盖条件下, 坡面流阻力主要受波阻力影响最大, 但由于坡面水深较浅, 还需要考虑颗粒阻力产生的影响。秸秆覆盖条件下, 坡面流阻力显著降低, 这与肖培青等^[31]、王俊杰等^[25]和张冠华^[32]在植被覆盖条件下的研究结果一致。其中肖培青等^[31]研究发现草地和灌木坡面阻力系数分别是裸坡的 5.58~7.45 倍和 5.61~6.26 倍; 而本研究中 3 种长度秸秆覆盖坡面阻力系数分别较裸坡增加了 20.89、15.69 和 8.17 倍, 充分显示了秸秆覆盖的“增阻”效应。

植物残体覆盖土表是当前普遍采用的一种保土措施, 在中国的坡耕地上使用也较为广泛; 中国干旱地区, 播种后往往会迎来当年的雨季, 此时地表植被覆盖稀疏, 秸秆覆盖将对水土保持起到重要的作用^[33], 而对秸秆覆盖条件下坡面水动力学特性的研究, 对在坡耕地上合理布设水土保持措施具有重要的意义。在实际生产建设活动中, 由于人为破坏了原生地质地貌、生态水文、土壤植被等, 为土壤侵蚀的发生创造了条件^[34]; 在人工堆积体土石混合介质表面布设秸秆覆盖措施可有效防止土壤流失的产生。秸秆是否与表土紧密接触是秸秆发挥防蚀作用的重要条件, 加之工程堆积体土体较为松散、坡度相对较陡, 因此秸秆越短越有利于在表土层形成致密的秸秆层, 对坡面径流的阻力更大, 更有利于防止水土流失。秸秆覆盖影响坡面土壤侵蚀的研究目前较多, 但多侧重于秸秆覆盖量和秸秆覆盖度等因素, 而针对秸秆长度的研究还较为少见。由于秸秆长度不同, 决定了单位质量秸秆个体数量的多寡; 秸秆越小, 单位个体越多; 反之则越少。与此同时, 短秸秆更利于在地表行程交叉纵横、相互叠加的空间结构, 减缓流速, 增加了坡面流阻力; 但缺点是当流量较大时更容易随水流发生空间位置的改变和沿水流方向产生短距离迁移。例如横向位置的秸秆在水流作用下产生转向, 从而对水流产生导流作用, 进而使局部流速加快。而长秸秆条件下, 水流阻力相对较弱, 水流绕流而行, 对秸秆的拖拽力也相对较小, 反而不易发生空间位置的改变。由此也说明秸秆长度变化对坡面流水动力学参数的影响较为深刻, 进而也会对坡面土壤侵蚀过程产生一定的影响, 需要引起重视。此外, 每次人工模拟冲刷试验所用秸秆并不是固定在冲刷槽床面上的, 而是每次试验时更换新的秸秆。因此, 每

次试验的坡面秸秆空间结构均会有所不同, 可能会对试验结果产生一定的影响。后续的研究还需考虑将秸秆均匀铺撒并黏贴于冲刷槽床面, 以便更精确地分析秸秆覆盖下坡面流水动力学参数的变化特征。

4 结 论

本文利用室内人工模拟径流冲刷手段, 采用定床阻力试验方法, 系统研究不同长度的秸秆覆盖条件下坡面流水动力学参数随流量和坡度的变化规律。结果表明, 秸秆覆盖条件下, 坡面流以层缓流为主, 并随流量增加逐渐转变为过渡缓流。不同长度的秸秆覆盖坡面雷诺数较为接近。秸秆覆盖坡面流水深较裸坡增加 145.64%, 并随秸秆长度增加而降低; 流速较裸坡降低了 55.54%, 随秸秆长度增加呈增加趋势。秸秆覆盖条件下, 坡面流流态指数随秸秆长度和坡度的增加总体呈降低趋势; 当秸秆长度由 3~5 cm 增加至 13~15 cm 时, 流态指数平均由 0.716 降至 0.501。坡面流 Darcy-Weisbach 阻力系数随秸秆长度增加而降低, 并随秸秆长度增加, 阻力系数与雷诺数的幂函数关系由正比例关系转变为反比例关系。曼宁糙率系数随秸秆长度增加而显著降低, 且 3 种秸秆长度条件下, 曼宁糙率系数随雷诺数呈增加趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 3-8.
Tang Keli. Characteristics and perspectives on scientific discipline of soil erosion and soil and water conservation in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 3-8. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨青森, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 1-5.
Yang Qingsen, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effect of mulch cover on hillslope soil erosion and nutrient loss in black soil region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil Water Conservation, 2011, 31(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [3] Bhatt R, Khera K L. Effect of tillage and mode of straw mulch application on soil erosion in the submontaneous tract of Punjab, India[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88 (1/2): 107-115.
- [4] 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.
- [5] Edwards L, Burney J R, Richter G, et al. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 81(3): 217-222.
- [6] 严坤, 王玉宽, 徐佩, 等. 秸秆覆盖对三峡库区坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 6-10.
Yan Kun, Wang Yukuan, Xu Pei, et al. Effects of mulch cover on slope erosion in Three Gorges Reservoir area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 6-10. (in Chinese with English abstract)

- [7] 徐锡蒙, 郑粉莉, 吴红艳, 等. 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.
Xu Ximeng, Zheng Fenli, Wu Hongyan, et al. 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)
- [8] 朱高立, 黄炎和, 林金石, 等. 模拟降雨条件下秸秆覆盖对崩积体侵蚀产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 27—31.
Zhu Gaoli, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Effect of straw mulch in colluvial soil erosion and yield of runoff and sediment under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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, 15(1): 9—11.
Tang Tao, Hao Mingde, Shan Fengxia. Effects of straw mulch application on water loss and soil erosion under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 9—11. (in Chinese with English abstract)
- [10] Giménez R, Govers G. Effects of freshly incorporated straw residue on rill erosion and hydraulics[J]. Catena, 2008, 72(2): 14—223.
- [11] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6091—6101.
Lin Chaowen, Luo Chunyan, Pang Liangyu, et al. Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6091—6101. (in Chinese with English abstract)
- [12] Giménez R, Govers G. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(5): 1475—1483.
- [13] Dunkerley D. Flow threads in surface run-off: Implications for the assessment of flow properties and friction coefficients in soil erosion and hydraulics investigations[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(8): 1011—1026.
- [14] Foster G R, Johnson C B, Moldenhauer W C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalks and wheat straw mulch for erosion control[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(4): 940—947.
- [15] 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)
- [16] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395—402.
Zhang Guanghui Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulics[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 395—402. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14—19.
Wu Shufang, Wu Pute, Yuan Lifeng. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [18] 吴秋菊, 吴发启, 王林华. 土壤结皮坡面流水动力学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 73—80.
Wu Qiuju, Wu Faqi, Wang Linhua. Hydrodynamic characteristics of overland flow under soil crusts condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 73—80. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨锦, 吕宏兴, 上官周平. 薄层水流水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 58—60.
Yang Jin, Lü Hongxing, Shangguan Zhouping. Experiment study on hydraulic properties of overland flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 58—60. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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)
- [21] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 46—52.
- [22] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1945, 56(3): 275—370.
- [23] 丁文峰, 李占斌, 丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72—75.
Ding Wenfeng, Li Zhanbin, Ding Dengshan. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [24] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships[J]. Transactions of the ASABE, 1984, 27(3): 790—796.
- [25] 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.
Wang Junjie, Zhang Kuandi, Gong Jianguo, et al. Overland flow resistance law under different vegetation coverage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [26] Pan C Z, Shangguan Z P, Lei T W. 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.
- [27] Hsieh P, Bolton S. Laminar surface water flow over vegetated ground[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(3): 335—341.
- [28] 郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 264—267.
Guo Yuhua, Zhao Tingning, Sun Baoping, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 264—267. (in Chinese with English abstract)

- [29] 李勉, 姚文艺, 杨剑锋, 等. 草被覆盖对坡面流态影响的人工模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 513-523.
Li Mian, Yao Wenyi, Yang Jianfeng, et al. Experimental study on the effect of grass cover on the overland flow pattern in the hillslope-gully side erosion system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(4): 513-523. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王玲玲, 姚文艺, 申震洲, 等. 草被覆盖度对坡面流体力学参数的影响及其减沙效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 80-83.
Wang Lingling, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Effects of grass coverage on shallow flow hydraulic parameters and sediment reduction[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 80-83. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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 with English abstract)
- [32] 张冠华. 茵陈蒿群落分布格局对坡面侵蚀及坡面流动力学特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Zhang Guanhua. Influence of Patterned Artemisia Capillaris on Slope Erosion and Overland Flow Hydrodynamic Characteristics[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [33] 史志华, 张凤宝. 土壤侵蚀动力过程与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [34] 张乐涛. 工程堆积体陡坡土壤侵蚀动力过程试验研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院, 2013.
Zhang Letao. Experimental Study on Dynamic Process of Soil Erosion of Engineering Accumulation in Steep Slope During the Process of Engineering Construction[D]. Yangling: The University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese with English abstract)

Hydraulic characteristic of overland flow on loess farmland slope under mulch with different wheat straw lengths

Li Chaodong^{1,2}, Li Zhanbin¹, Ma Jianye¹, Ma Bo^{1*}

(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. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Straw mulching is one of the important conservation tillage measures, and has a positive effect on reducing soil erosion on slopping farmland. In order to study the impact of straw length on the hydrodynamic characteristics of overland flow, indoor artificial fixed bed erosion resistance experiments were carried in the Soil and Water Conservation Engineering Laboratory in Northwest A&F University. The study area was located in the southern Loess Plateau, Shaanxi Province, China (34°14'-34°20'N, 107°59'-108°08'E). By the scour trough, the variations of hydrodynamic parameters of overland flow such as flow velocity, runoff depth, Reynolds number, Froude number, Darcy-Weisbach resistance coefficient and Manning roughness coefficient were determined at 4 slope gradients (3°, 5°, 10° and 15°), 5 flow rates (3.0, 4.5, 6.0, 7.5 and 9.0 L/min) and 3 wheat straw lengths (3-5, 8-10 and 13-15 cm). The slope without straw mulch was considered as the control (CK). The results showed that under the experimental condition, the wheat straw length greatly affected the hydrodynamic parameters. Under straw mulching with different straw lengths, Reynolds number ranged from 166 to 558, the overland flow was primarily laminar and subcritical flow when the flow rate was less than or equal to 7.5 L/min, and transformed into transition and subcritical flow while the flow rate was 9.0 L/min. Under the conditions of straw mulching, compared with bare slope, the overland flow ran with smaller flow velocity and higher runoff depth, Darcy-Weisbach resistance coefficient and Manning roughness coefficient. Straw length affected the runoff depth. Compared with the bare slope, the runoff depth of overland flow on slope with the straw length was increased by 107.69%-178.64%. Straw mulching could decrease the flow velocity by 48.30%-60.64% than the CK. The runoff depth decreased as the straw length increased, and the flow velocity increased with the increase in straw length. The flow state index of overflow with straw mulching was reduced with increased of straw length and slope gradient. When the straw length increased from 3-5 cm to 13-15 cm, the average flow state index was decreased from 0.716 to 0.501. The Darcy-Weisbach resistance coefficient was 0.14-1.47 on bare slope, 2.67-8.00 on slope with 3-5 cm straw mulch, 2.39-6.36 on slope with 8-10 cm straw mulch and 1.31-4.28 on slope with 13-15 cm straw mulch, respectively. It averagely increased by 20.89, 15.69 and 8.17 times respectively compared with the bare slope, indicating that the straw mulch could strongly resist the flow movement. Darcy-Weisbach resistance coefficient was decreased with the increase in straw length. The Manning roughness coefficient was 0.013-0.044 on the bare slope, 0.071-0.132 on slope with 3-5 cm straw mulch, 0.067-0.118 on slope with 8-10 cm straw mulch and 0.049-0.083 on slope with 13-15 cm straw mulch, respectively. It increased by 4.38, 3.64 and 2.33 times respectively compared with the bare slope. Manning roughness coefficient was reduced with straw length increased. This study could provide reliable information for clarifying the mechanism behind soil erosion with straw mulching on farmland slope.

Keywords: flow patterns; hydrodynamics; straw; overland flow; fixed bed test; Loess farmland