SHUILI XUEBAO

文章编号:0559-9350(2017)06-0738-10

晋西黄绵土坡面径流流态与输沙特征试验研究

付兴涛

(太原理工大学 水利科学与工程学院,山西 太原 030024)

摘要:为了探讨晋西黄绵土坡面径流流态与输沙特征,本研究采用室内人工模拟降雨试验方法,对降雨条件下坡 长对该区坡面径流雷诺数、弗劳德数、径流量、产沙量与输沙率进行量测与分析。结果表明:在雨强 30~125 mm/h、坡长1~5m的情况下,坡面薄层径流为层流,且为急流;径流流态对坡面水流侵蚀力有显著影响,产沙 量与雷诺数呈良好幂函数关系;雨强与坡长的增大可增强径流紊动性,输沙率随二者的增大呈增加趋势,当雨强 大于60 mm/h、坡长由3m延长到4m时,输沙率增量较2~3m与4~5m时小;输沙率与径流量的关系可用幂函 数描述。该研究结论能够为黄土陡坡面水土流失治理和水土保持措施的布设提供一定的依据。 关键词:黄绵土;坡长;雨强;径流流态;输沙率;径流量

中图分类号: S157.1 文献标识码: A doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160926

1 研究背景

晋西黄土高原区山高坡陡,沟壑纵横,土质疏松,植被缺乏,年降水分布不均,短历时大强度 暴雨多集中于夏季,极易造成严重水土流失以及加速侵蚀。以该晋西王家沟流域有代表性的黄绵土 为典型对象,研究黄绵土坡面径流流态与输沙特征,对于该区坡面水土保持措施的布设及农业发展 具有重要意义。

在径流流态方面目前尚无定论。大部分学者认为坡面流不同于普通的层流、紊流和过渡流,处 于一种混合状态^[1],即降雨条件下的坡面流为紊流和过渡流的混合体^[2],或基本处于过渡流和紊流的 范畴^[3],且在时空分布上是非均匀和非稳定的^[4]。敬向峰等提出用绕流雷诺数的概念来判断流态,下 临界雷诺数为0.35,上临界雷诺数为900,得出目前的水流流态大部分属于过渡流,但由于其试验数 据和条件有限(没有层流区点据),所以在流态判断中,绕流雷诺数不能被广泛应用^[5],多用二维明 渠流态判断标准。也有学者提出坡面流是介于层流与紊流之间的一种特殊水流^[6],或由层流过渡到 紊流^[7],或坡面上部为层流,坡面下部为紊流^[8],初始地表糙度越大的坡面,径流越容易稳定在层流 状态,反之,径流越倾向于紊流^[9]。第三种观点认为坡面径流的弗劳德数和雷诺数均属层流的缓流范 畴^[10]或者层流的急流范畴^[11]。

输沙过程的研究是分析坡面径流侵蚀过程的一个非常重要的指标,目前国内外就径流流态、降雨、坡度、坡长、上方汇水以及下垫面等情况对径流输沙过程的影响进行了诸多研究,采用径流量、径流剪切应力、单位水流功率等动力学参数对输沙过程进行描述。坡面径流流态不同,降雨对输沙率的影响程度不同^[12],次降雨量和最大30min雨强是影响流域产流输沙的主要降雨特性^[13],Guy 在大量试验基础上指出降雨影响下坡面薄层水流(坡面径流深 < 1 mm)的泥沙输移能力明显提高^[14],并提出在上方来水与降雨影响下的坡面泥沙输移模型^[15],尽管此模型能够很好地模拟坡面薄层流土

收稿日期: 2016-09-01; 网络出版日期: 2017-06-14

网络出版地址: http: //kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170614.1456.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51309173)

作者简介:付兴涛(1982-),博士,副教授,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水资源利用与保护研究。

E-mail: fuxingtao@tyut.edu.cn

壤侵蚀过程,但其适用条件有限,如对野外自然坡面稳定情况、颗粒范围、坡度等都有一定的要求,故其模型还有待于大量的试验及数据进行改进。有研究者指出输沙率随坡度呈抛物线变化趋势,并指出临界坡度在21°~24°之间^[16],单位面积输沙率随坡长的增加呈强弱交替变化,侵蚀-搬运过程与侵蚀-沉积过程交替发生^[17],上方汇水引起坡面下部净侵蚀产沙量^[18],增加水流含沙量^[19]。不同下垫面条件下输沙率变化趋势不同,如裸地土壤坡面输沙率呈先增后减再增的变化趋势,而草地先增后减^[20],土壤改良后能显著减少径流输沙率^[21]。输沙率随径流流量、径流切应力的增加而增加^[22],WEPP模型运用径流剪切力描述径流分离与输沙^[23],而EUROSE^[24]与LISEM^[25]模型均采用单位水流功率描述泥沙输移。

上述研究主要着重于雨强、坡长、坡度、径流量、下垫面情况和上方汇水等对坡面径流流态及 泥沙输移的影响,对于揭示坡面径流侵蚀规律具有很重要的意义,特别是在黄土区已经有大量研究 成果。然而,所得出的坡面薄层径流流态结论由于研究条件不同而无定论,对于坡面径流输沙方面 的研究受试验条件限制,在不同区域也得出不同的结论,难以在其他区域推广应用,尤其是针对晋 西王家沟流域典型的离石黄土母质上发育的黄绵土,输沙特性随坡长变化的研究较薄弱。鉴于此, 本研究采用室内人工模拟降雨方法,通过分析降雨影响下20°陡坡不同坡长径流流态变化规律,探讨 不同坡长下径流输沙特征,试图得出该区坡面径流流态与坡长、雨强的变化关系,以及不同流态影 响下坡面输沙率与径流的关系,为该区坡面水土流失治理及水土保持措施布设提供基本依据。

2 材料与方法

2.1 试验设计与方法 模拟降雨试验于2014年8—11月在室内进行。根据山西省水土保持科学研究 所径流测验资料(1955—1981年),王家沟流域山坡上部20°左右是当地的主要农田,16°~20°范围内 耕地面积比重最大,占25.6%,因此,设计试验坡度为20°。另外,研究显示,该区坡面上果园等种 植的株行距一般设置为2×3m、2×4m或3×4m^[26],柠条的布设间距为4m^[27],为了研究此坡长范围内 土壤侵蚀规律及水土保持措施布设提供依据,试验设计坡长分别为1、2、3、4和5m,宽度为0.5m 的径流槽。根据该区暴雨统计,王家沟流域降雨量高度集中,且历时短,强度大,是造成土壤侵蚀 的主要原因,其中暴雨强度多集中于60~90 mm/h范围内^[28]。山西省水文局降雨监测资料显示,该研 究区强度大于24 mm/h的降雨占降雨总数的50%左右,汛期最大降雨强度达到90.30 mm/h,因此,本 试验设计降雨强度为30、60、80和125 mm/h。喷头装置在离地面10m的高度上,径流槽四周均匀放 置35个雨量筒(直径:85 mm;高:200 mm)进行降雨均匀度测定及雨强标定。

每场降雨前在坡面不同部位取土样测定土壤含水量,以保证所有降雨试验土壤前期水分含量(绝对含水量)相对一致,均在13.99%(容积含水量)左右。试验过程中,记录降雨开始产流时刻,产流后每隔2min用1L(1个或多个)的标有刻度的塑料瓶在坡面出口处采集一次径流泥沙样,并量好水温,以计算坡面径流输沙过程,自产流开始持续降雨30min,共采集15个径流样品。由于5个不同坡长的径流槽并排放置,所以每场降雨5个坡长可同时进行降雨试验。每场降雨重复两次,共降雨8场,有效降雨8场。将含有泥沙的塑料瓶带回实验室静置24h,通过测量瓶中水的深度得出径流体积,然后倒去上清液,将泥沙烘干称质量(105°C的条件下烘12h)得到泥沙量,泥沙质量除以采样时间,得到该时段径流输沙率,试验土、水样于2014年8—11月在实验室进行分析,取两次重复试验的产流产沙平均值作为最终试验结果。

本试验降雨监测系统选择由中国科学院水利部水土保持研究所与西安清远测控技术有限公司共同研发的便携式全自动人工模拟降雨器,装置由降雨器、自记雨量计、主控制器、信号采集器组成,各部分参数值见表1。为使模拟降雨雨滴形态、降雨均匀度与天然降雨物理性能尽可能相似,该系统采用世界上唯一专业生产模拟雨滴喷头的美国SPAYING SYSTEMS CO公司生产的FULLJET旋转下喷式喷头,3种不同规格的垂直下喷旋转式雨滴模拟专用喷头,叠加成3组雨滴喷射组,降雨投射面相互均匀叠加形成降雨区间,既可有较大雨强变化,又可保证(小雨、中雨、大雨)雨滴模拟效

— 739 —

表1 人工模拟降雨监测系统参数表

序号	设备名称	型号	设备参数
1	降雨器	QYJY-501	喷头(FR/11、FR/13、FR/15);雨强连续变化范围15~200mm/h;降雨可 覆盖面积5×5m ² ;雨滴大小调控范围0.3~5.7mm;降雨调节精度7mm/h; 误差≤2%。
2	自记雨量计	SL3-1	承水口径Φ200±0.6mm; 分辨力0.1mm; 准确度4%。
3	主控制器	SC-101	工作电压 AC220V/50Hz; 工作环境温度 0 ~ 60℃; 湿度≤95% RH(+40℃); 数据存储容量≥32000条; 采集间隔 10 ~ 9999s; 通讯接口 RS232。
4	信号采集器	QYCJ-2	工作电压 DC24; 工作环境温度-10°~50℃; 湿度≤95%RH(+40℃); 数据 存储容量≥32000条; 通讯接口 RS232。

果,从而形成从小到大的连续可调雨强。由于该模拟降雨器控制系统由雨量计装置和附属数据采集器组成,可实时采集雨强、压力和流量等数据,因此,既能显示模拟降雨的动态变化及曲线,又便于很快调节得到试验模拟雨强要求值。模拟器降雨调节精度为7 mm/h,误差≤2%,但模拟降雨试验前研究者仍然对雨强进行了标定,并计算得出该模拟器的降雨均匀系数在85 %以上(与厂家给出的均匀度值0.86 相吻合),其降雨均匀度、雨滴分布和降雨终点速度都能达到较理想的效果。

2.2 径流槽的装填 试验土壤取自晋西王家沟流域,地理坐标为东经111°11′,北纬37°31′。根据《晋 西黄土丘陵沟壑区水土流失综合治理开发研究》,试验土壤分布在流域内侵蚀严重的沟坡上,母质为 新生界第四系中更新统离石黄土^[29]上或晚更新统马兰黄土与中更新统离石黄土的混合土。土壤表面 无植被生长(土地利用类型为裸地),表层土壤容重为1.35 g/cm³,有机质含量13.42 g/kg,pH值为 8.15,土壤初始容积含水量13.99 %,总孔隙度49.05 %,根据国际制粒级划分标准,土壤黏粒含量为 1.75 %,粉砂粒为14.2 %,砂粒为84.05 %,质地为轻壤土。流域最大年降雨量711.50 mm,最小年降 雨量240.20 mm,多年平均年降雨量490.30 mm,年平均气温8.90 ℃,实测多年输沙模数为7651 t/ km²,试验区的土壤、气候在晋西黄土高原有较好的代表性^[30]。

在当地选择2×4 m的空地,每隔10 cm分层取土,取土总深度为50 cm,按野外土层顺序分别装 袋。运回温室内后,将土壤风干并去除杂质。装土时,在径流槽底部均匀装入5 cm厚的细沙,并铺 上透水纱布,以使径流槽底部土壤透气透水性接近自然状态,然后在纱布之上装填45 cm厚的供试土 壤。装土前通过烘干法测定土壤含水量,严格控制土壤容重与自然状态一致。为确保装填土壤均匀 一致,按照野外原始土壤层次以9 cm为一层,共分为5层将土装入径流槽内,试验径流槽分层填土 时,边填土边压实并尽量保证各处填土厚度均匀,每填完并压实一层后,在填装上面一层之前,将 下面一土层表面用齿耙耙松,然后再填上面一层土壤,以保证两个土层的接触面均匀一致。将土槽 静置1个月,并定期洒水,使槽内土壤沉实到接近自然状态,用环刀法测定沉实后槽内土壤容重,直 到槽内土壤容重接近自然状态时方可进行人工模拟降雨试验。在保证试验设计容重并使下垫面土壤 条件的变异性达到最小的同时,在土壤与土槽边壁接触的地方尽量压实,并于装土结束后用平尺将 土壤表面刮平,以减小边壁边际效应对坡面产流、产沙过程的影响。

2.3 水动力学参数的计算

2.3.1 流速 鉴于坡面水流水层很薄且各点的流速分布不均匀,常用断面平均流速来代替实际流速。本文流速测定采用染色剂法(KMnO₄)^[31],先确定观测断面,观测断面往上0.50m为一个观测间距,用注射器注射染料,当染料碰到径流表面时,用精确到0.01s的秒表开始计时,直到至少1/2观测断面被染料触碰停止计时。整个流速测量过程由坡面产生稳定径流开始至降雨结束。选择有明显径流的坡段(非细沟内)进行流速测量,得到多个表面流速值,求平均值为观测间距内平均表面流速 *V_s*。而试验相关水动力学参数采用平均流速*V*进行计算,根据*V=kV_s*(其中*k*为系数),平均流速随着雷诺数的增大而增大,对于层流、过渡流、紊流系数分别为0.67、0.70和0.80^[32],本文中根据预先初略计算的坡面流态选择合理的系数进行流速计算,然后根据计算得到的流速重新计算*Re*确定准确的流态。

— 740 —

2.3.2 径流深 径流深是反映坡面水流水力特征的重要因子,但目前尚没有成熟的坡面流理论,只 好借鉴河流动力学的原理和方法进行计算^[33]。由于坡面水流水层极薄,且土壤下垫面条件不断发生 变化,采用实测法难以准确测定。因此假定局部地区水流沿坡面(分坡上、坡中、坡下)是均匀分布 的^[10],采用下式计算:

$$h = \frac{q}{v} = \frac{Q}{v \times Bt} \tag{1}$$

式中:h为径流深,m;q为单宽流量,m³/(min·m);Q为t时间内的径流量,m³;t为径流取样间隔时间,s;v为断面平均流速,m/s;B为过水断面宽度,m。

2.3.3 雷诺数及弗劳德数的计算 雷诺数及弗劳德数是判断水流流态的主要指标。对于明渠水流,

$$Re = \frac{\nu R}{\nu} \tag{2}$$

式中:v为平均流速, m/s; R为水力半径, m; v为运动黏滞性系数, m²/s, (与水温有关, 试验过程 中测量水温)。

由于坡面各处土壤抗侵蚀能力不同,导致水流冲刷过程中坡面微起伏的不断改变,及坡面每一固定测点水力学参数随着降雨历时的延长及雨强的变化而不同,使得薄层水流在时间和空间上分布 是非稳定和非均匀的。依据明渠水流的判断标准,坡面薄层水流可视为二元结构的明渠流^[5],因此本 文采用水力学二元流雷诺数法判别坡面薄层水流的流态,以500为界判别是否有紊流出现, *R_e*大于 500时为紊流^[34],计算公式为:

$$Re = \frac{vh}{v} \tag{3}$$

式中: h为坡面薄层水流径流深, m。

弗劳德数 Fr代表水流的惯性力和重力作用的对比关系,用来判别水流的流型流态。其计算公式为^[9]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{4}$$

式中:g为重力加速度,m/s²。

2.4 数据分析 将每次降雨流出径流小区出口断面的流量作为最终地面径流量,将出口断面的泥沙 量作为最终的土壤流失量。首先,用 SPSS 统计分析软件做雷诺数、弗劳德数与产沙量的相关分析, 以定量评价雷诺数、弗劳德数与产沙量的相关性大小及二者对产沙的贡献率。然后,绘制坡面径流 侵蚀产沙量与雷诺数的关系曲线以及各坡长下输沙率(单位时间内流过测流断面的干沙质量)随时间 的变化曲线。最后在对径流量与输沙率相关分析的基础上,进一步得出回归模型。

3 结果与分析

3.1 坡面径流流态 本研究根据水力学中二元流雷诺数判别方法确定坡面薄层水流流态。试验结果 (表 2)表明,雨强 30~125 mm/h 坡长 1~5 m时,弗劳德数基本均大于 1,说明在试验条件下坡面薄层 径流为急流;径流雷诺数在 7.83~90.99 范围内变化,均小于 500,说明径流为层流范畴。相同坡长 下坡面径流雷诺数随着雨强的增大而增大,且雨强越大其紊动性越强。分析其原因,雷诺数与径流 流速及径流深有关,当雨强较小时降雨主要用于原地渗透,基本上不形成径流,即使形成径流在沿 坡面向下流动的过程中很快渗透,随着降雨强度的增大,当雨强大于土壤入渗率时,坡面径流来不 及渗透而沿坡面向下流动,即形成超渗产流,尤其是当细沟形成后,坡面水流汇集于细沟内部,由 面状漫流变为线状股流,其径流深、流速均有较大增加。试验观察到降雨开始至径流形成之初,坡 面主要以雨滴的溅蚀作用为主,随着径流量的增加,薄层水流分布于整个坡面并流出坡面。随着降 雨时间的延续,坡面中部和下部首先形成诸多微小的跌坎,跌坎逐渐发育形成细沟。就坡面平均径 流深与流速而言,以坡长1 m 为例,试验测得雨强由 30 mm/h 增大到 125 mm/h,坡面平均流速分别为

— 741 —

0.08、0.10、0.12及0.13 m/s,平均径流深分别为0.11、0.12、0.18及0.23 mm,说明随着雨强的增大 坡面径流深与流速增大,从而增强水流的紊动性。

另一方面,雨强由 30 mm/h 增加到 125 mm/h 时,试验过程中用滤纸色斑法测得各雨强下雨滴平 均直径分别为 0.55、1.17、1.80及 2.48 mm,说明雨强越大雨滴直径越大,雨滴对于坡面径流的扰动 增强,很大程度上增加了径流的紊动性。另外,试验过程中观察到注入到径流中的示踪剂迅速出现 横向及垂向扩散,雨滴降落时将水流溅开使得床面瞬时露出,雨滴越大对坡面的溅蚀作用越强,极 易在坡面留下溅蚀坑,可增大水流的紊动性,而较大雨强的降雨在水面上形成水波,水波的扩散和 相互碰撞也能增大水流的紊动性。

坡长/m	温度/℃	雨强/(mm • h ⁻¹)	雷诺数	流态	弗劳德数
1	15.0	30	7.83	层流	2.59
1	16.0	60	10.62	层流	2.96
1	15.0	80	19.77	层流	2.89
1	17.0	125	25.24	层流	2.62
2	15.0	30	10.36	层流	2.10
2	16.0	60	19.15	层流	1.77
2	15.0	80	22.35	层流	2.29
2	17.0	125	50.82	层流	2.20
3	15.0	30	12.82	层流	2.19
3	16.0	60	21.18	层流	2.36
3	15.0	80	46.78	层流	2.32
3	17.0	125	65.59	层流	2.25
4	15.0	30	12.69	层流	2.67
4	16.0	60	30.63	层流	2.73
4	15.0	80	54.96	层流	2.39
4	17.0	125	78.30	层流	2.53
5	15.0	30	22.37	层流	2.80
5	16.0	60	42.76	层流	2.06
5	15.0	80	81.06	层流	1.80
5	17.0	125	90.99	层流	2.72

表2 不同坡长及雨强下坡面径流雷诺数与弗劳德数

相同雨强下,坡面径流紊动性随着坡长的延长而增强,且雨强越大坡面水流沿坡长的紊动性增 幅越大。其原因可能是坡面承雨面积随着坡长的延长而增大,导致径流量随之增大,而坡长越长重 力势能越大,转化为动能时能量自然也就大,流速也就快,当坡面流速增大后,各流层之间液体质 点的混掺作用在不断加强,从而导致雷诺数增大。另外,随着坡长的延长,坡面微地貌对薄层水流 的影响加剧,使水流不可避免地出现局部波动,紊动程度加强。

在明确了坡面径流的流态后,本文对坡长1~5m,雨强30~125mm/h试验所得的径流雷诺数、 弗劳德数与产沙量的关系进行了相关分析与回归分析,结果表明(表3),产沙量与雷诺数在0.01水平 上均呈极显著正相关关系,相关系数0.76,说明径流流态对坡面薄层水流侵蚀力的大小有显著影 响,肖培青等通过研究上方汇水与降雨强度对坡面径流流态的影响时也指出,坡面水流雷诺数在降 雨强度与汇流的共同影响下增大,从而导致侵蚀产沙量迅速增大^[35],与本文研究结论吻合。

产沙量与弗劳德数相关性较差,呈微弱的负相关关系,相关系数为-0.12。回归分析表明产沙量随着雷诺数的增大而增大,二者的关系可用幂函数很好地表达(*R*²=0.87)。从图上分析可知(图1),雷诺数较小时,产沙量增幅不明显,雷诺数较大时,产沙量增幅也较大。如5m坡长雷诺数较坡长1m时大,坡长1m时雨强由30mm/h增大到125mm/h,雷诺数增幅17.41,相应产沙量增加0.32 kg,而坡

-742 -

表3 坡面径流产沙量与雷诺数、弗劳德数的相关性分析

	产沙量	雷诺数	弗劳德数
产沙量	1		
雷诺数	0.76**	1	
弗劳德数	-0.12		1

注: **P<0.01, *P<0.05, N=20.

长5m时雷诺数增幅68.62,相应产沙量增加2.84 kg,进一步说明雷诺数对产沙量有显著影响,分析 其原因,一方面,随着雨强的增大雨滴对于坡面表 层土壤的溅蚀作用为径流侵蚀产沙提供物质来源, 且加强了坡面水流的紊动性,被扰动了的水体搅 起、翻动及挟带坡面松散物质流出出口的能力增 强,产沙量增大;另一方面,雷诺数是径流惯性力 与黏滞力的比值,坡长的延长使得降雨过程中坡面 汇流面积增大,坡面下部径流流速加快,水流惯性



力起主导作用,扰动水体增强其侵蚀能力,特别是当坡面产生大量的细沟时,更多的径流集中成股向下流动,侵蚀产沙的能力大大增强。

3.2 坡面径流输沙过程

3.2.1 雨强对输沙率的影响 结果显示,相同坡长下坡面径流输沙率随着雨强的增大呈增加趋势, 与汪邦稳^[36]的研究结论相似(表 4)。分析产生上述结果的原因,雨强较小意味着降雨动能小,对土壤 表面颗粒的溅蚀作用较大雨强时小,且降雨大部分就地入渗。随着降雨强度的增大,雨滴对于坡面 土粒的击溅破坏作用增强,为径流提供较多的物质来源,且雨滴的击溅可能阻塞土壤表面孔隙, 使得单位时间内坡面径流量增大,而相同坡度条件下,坡面径流单宽输沙率随着流量的增加而增 加^[37],导致输沙率随雨强增大而增加。坡长1m时输沙率随雨强增大缓慢增加,但输沙率整体较2、 3、4及5m坡长小,可能由于坡长较短时(1m),径流能量主要用于剥蚀表层疏松颗粒并将其携带出 出口,但短坡长能够用于携带的物质量有限,导致其输沙率较小。而随坡长的延长,坡面表层可供 径流携带的松散颗粒物质多,且坡长的延长导致流速加快,单位时间内径流量增加,增强了其挟沙 能力使得输沙率增加。

另一方面,雨强由30 mm/h增大到60 mm/h时各坡长输沙率较60 mm/h增大到80 mm/h以及80 mm/h增大到125 mm/h时增幅明显(表4),由此初步推断60 mm/h左右雨强可能是该区土壤侵蚀明显加剧的下限雨强,需重点监测,以减少坡面水土流失。分析其原因,雨强越大导致坡面下部径流深与流速越大,局部坡面在短时间内有细沟出现或者局部侵蚀坍塌,导致输沙率的小幅波动,雨强越大,其对坡面土壤的侵蚀能力越强,且雨强越大坡长越长坡面径流的冲刷作用明显且不稳定,使得坡面径流侵蚀可能由片蚀转化为细沟侵蚀,形成时分时合的细沟,导致坡面输沙率的不稳定变化。由于试验设计雨强是定值(30、60、80、125 mm/h),故只是初步推断该试验区侵蚀增强的下限雨强为60 mm/h左右,在后续试验过程中将增加30~60 mm/h及60~80 mm/h之间的降雨强度,以便进一

雨强/(mm • h ⁻¹)	1 m	比值	2m	比值	3m	比值	4m	比值	5m	比值
30	0.01	—	0.02	—	0.02	—	0.03	—	0.04	_
60	0.03	3.00	0.07	3.50	0.10	5.00	0.20	6.67	0.23	5.75
80	0.06	2.00	0.08	1.14	0.17	1.70	0.17	0.85	0.27	1.17
125	0.17	2.83	0.65	8.12	1.66	9.76	0.80	4.70	1.46	5.40

表4 不同雨强与坡长下的输沙率

注: "比值"表示不同雨强输沙率之比, 如 3.00=0.03/0.01, 2.00=0.06/0.03

步验证并更加准确地确定该区侵蚀性降雨的临界 值。

3.2.2 坡长对输沙率的影响 试验结果显示(图 2),输沙率随坡长的延长整体呈增大趋势,雨强越 大输沙率波动越明显增幅越大。当雨强大于60 mm/h 时,坡长由3 m延长到4 m时输沙率增量较2~3 m 与4~5 m时小,雨强越大下降幅度越大。分析其原 因,坡面径流能量主要用于自身流动、剥蚀土壤以 及输移泥沙,能量的分配在其沿坡面流动过程中是



不断变化的,使床面泥沙以及被携带搬运的泥沙在径流作用下不断交换^[38],导致坡面土壤侵蚀并 不是随着坡长的延长不断增加,而呈现一定的波动性^[39]。坡长越长径流用于自身流动和携带泥沙的 能量越大,用于剥蚀土粒的能量越小,当达到其挟沙能力时,径流能量不足以支撑其继续剥蚀土 壤,导致坡长的增加不会使输沙率增加或增幅变小。

根据降雨过程中对坡面平均流速的测量,以雨强125 mm/h为例,坡长由1 m延长到5 m时,坡面 径流平均流速分别为0.12、0.14、0.15、0.18及0.20 m/s,呈明显增大趋势,流速越大则说明径流能量 越大,并且对坡面土壤的剥离和搬运能力越大,意味着输沙率越大。试验结果显示当坡长小于4 m时 符合这个规律,1~3 m输沙率分别为0.17、0.65和1.66 kg/min,但当坡长延长至4 m时流速增加,输 沙率反而较3 m时减小(4 m为0.80 kg/min、5 m为1.46 kg/min),说明径流能量除消耗于自身流动及搬 运泥沙外,未必有足够的能量用于继续剥蚀土壤表面颗粒,因此,初步推断雨强大于60 mm/h且坡长 达到4 m时,径流可能不再主要以剥蚀为主,而存在剥蚀与沉积交替的现象,最终导致出口断面的输

沙率不再增加,且降雨后观察坡面形态可知,坡面下部 并没有连通的细沟出现,也进一步说明了剥蚀与沉积交 替现象的存在。

如图 3 为 5 m 坡长坡面下部所产生的侵蚀细沟,降 雨试验过程中观察到跌坎最先出现于坡面中下部,随着 径流能量的增大,经过溯源侵蚀与沟壁坍塌过程,细沟 长度和宽度逐渐发育,并最终趋于稳定,随着径流含沙 量的增大,必然导致其对土壤的剥蚀能力降低,同时其 所携带的泥沙开始沉积。李君兰等选择杨凌土(曾为农



图 3 坡面下部侵蚀细沟形态

耕地,休耕1年后的荒坡地)作为研究土壤,其结果表明,相同条件下流速在距离坡顶超过5m后依 然会增加,但含沙量并不会增加,说明超过输沙能力的采样长度后,径流不再以剥蚀为主,而是 剥蚀与沉积交替进行^[38]。雷廷武通过研究不同长度侵蚀细沟在坡度和入流量影响下侵蚀量及细沟 形态特征时指出,测定输沙能力的采样长度为2~4m,并通过对细沟形态变化分析进一步说明此 结论的正确性^[40],本研究坡长为1~5m,在采样长度范围内。由此可以得出相似的推断^[41],径流能 量及分配在其沿坡面向下流动的整个过程中不断变化,从而导致其所携带泥沙与其从沟床剥蚀的泥 沙之间不断交换,当超过输沙能力采样长度后,坡面土壤侵蚀与泥沙沉积过程会交替发生。

3.2.3 径流量对输沙率的影响 在整个降雨过程中,坡面经历了溅蚀、面蚀及细沟侵蚀3种侵蚀形式,径流在面蚀与细沟侵蚀中起着很重要的作用。将雨强30~125 mm/h时5个坡长输沙率随径流量的变化过程进行分析(图4),结果表明,随着径流量的增加,输沙率总体呈波动增大趋势,但随着径流量逐渐增大输沙率的增速与波动均较大。径流量小于0.01 m³时,输沙率呈缓慢且稳定增长,径流量在0.01~0.02 m³时,输沙率呈跳跃性增长,径流量0.02~0.05 m³之间时,输沙率增加速率较0.01~0.02 m³时快,而当径流量大于0.02 m³时,输沙率波动起伏非常大。分析其原因,一方面随着径流量增大,径流挟沙、冲刷能力增强,导致输沙率增大;另一方面可能由于径流量随着雨强和坡长的增加而增大,结合上述径流流态研究结论可知,随着坡长与雨强的增大径流雷诺数增大,说明径流紊

— 744 —



图4 输沙率随径流量变化

动性增强,增强了坡面径流的侵蚀能力,使得输沙率呈波动增大趋势。

基于上述研究结果可知径流量对于坡面泥沙输移有显著影响,为了定量描述输沙率与径流量的 相关程度以及输沙率随径流量的变化关系,将30~125 mm/h雨强与坡长1~5 m输沙率与径流量数据 进行相关分析和回归分析,结果显示,输沙率与径流量在0.01水平上呈极显著正相关关系(相关系数 0.76),二者的关系可用幂函数表示,模型拟合度较好(0.86):

$$S_{\alpha} = 85.86R^{1.86} \tag{5}$$

式中: S_a 为输沙率, kg/min; R为径流量, m³。

4 结论

在室内人工模拟降雨试验的基础上,主要探讨了晋西黄绵土裸坡面径流流态及输沙特征,得出 如下结论:

(1)雨强 30~125 mm/h, 1~5 m 坡长坡面薄层径流为层流且为急流;相同坡长下径流雷诺数随雨 强的增大而增大,且雨强越大紊动性越强;相同雨强下径流雷诺数随坡长的延长呈增加趋势,且坡 长越长雷诺数增加的幅度越大。

(2)径流流态对坡面薄层水流侵蚀力有显著影响,产沙量与雷诺数在0.01水平上呈极显著正相关 关系(相关系数0.76),可用幂函数表达。

(3)雨强与坡长均对输沙率有显著影响。相同坡长下输沙率随雨强的增大而增加,雨强达到 60 mm/h时各坡长输沙率陡然增大,输沙率随坡长的延长整体呈增大趋势,雨强越大输沙率波动越明 显增幅越大,雨强大于60 mm/h时,坡长由3 m延长到4 m时输沙率增量较2~3 m与4~5 m时小,雨 强越大下降幅度越大。因此,建议雨强大于60 mm/h时需重点监测,以减少坡面水土流失,可以3~ 4 m为间隔布设坡面水土保持措施。

(4) 输沙率与径流量具有良好的正相关关系,可用幂函数表示。

参考文献:

- [1] HORTON R E. Erosion development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bull. Soc. Am, 1945, 56: 275-370.
- [2] 陈国祥,姚文艺.降雨对浅层水流阻力的影响[J].水科学进展,1996,7(1):42-46.
- [3] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 159-165.
- [4] 郑良勇,李占斌,李鹏.黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J].水利学报,2004(5):46-51.
- [5] 敬向峰,吕宏兴,潘成忠,等.坡面薄层水流流态判定方法的初步探讨[J].农业工程学报,2007,23(5): 56-61.

- [6] 吴长文, 王礼先. 林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 32-38.
- [7] GUO Tailong, WANG Quanjiu, LI Dingqiang. Sediment and solute transport on soil slope under simultaneous influence of rainfall impact and scouring flow[J]. Hydrological Processes. 2010, 24 (11): 1446-1454.
- [8] FU X T, ZHANG L P, WU X Y, et al. Dynamic simulation on hydraulic characteristic values of overland flow [J]. Water resources, 2012, 39(4): 474-480.
- [9] 梁心蓝,赵龙山,吴佳,等.地表糙度与径流水力学参数响应规律模拟[J].农业工程学报,2014,30(19): 123-131.
- [10] 潘成忠,上官周平.牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J].水利学报,2005,36(3):371-377.
- [11] 雷俊山,杨勤科.坡面薄层水流侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价[J].泥沙研究,2004(6):22-26.
- [12] GUY B T, DICKINSON W T, SOHRABI T M, et al. An empirical model development for the sediment transport capacity of shallow overland flow: model validation[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(3): 518-526.
- [13] 宴清洪,袁翠萍, 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.
- [14] GUY B T, DICKINSON W T, RUDRA R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1378-1386.
- [15] GUY B T. Sediment transport capacity of shallow overland flow [D]. University of Guelph, Guelph, Ontario. 1990.
- [16] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土坡面水蚀动力与侵蚀产沙临界关系试验研究[J].应用基础与工程科学学报, 2010,18(3):435-441.
- [17] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀-搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
- [18] 张新和,郑粉莉,汪晓勇,等.上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响[J].西北农林科技大 学学报,2008,36(3):105-110.
- [19] 肖培青,郑粉莉.上方汇水汇沙对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2003,17(3):25-27,41.
- [20] 吴淑芳,吴普特,冯浩,等.标准坡面人工草地减流减沙效应及其坡面流水力学机理研究[J].北京林业大学学报,2007,29(3):99-104.
- [21] 刘纪根,张平仓,陈展鹏.聚丙烯酰胺对扰动红壤可蚀性及临界剪切力的影响[J].农业工程学报,2010, 26(7):45-49.
- [22] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J].农业工程学报,2005,21(7): 42-45.
- [23] FLANGAN D C, NEARING M A. USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation[R]. West Lafayette, Indiana, USA: USDA-ARS, NSERL, Report No 10 USDA-ARS, 1995.
- [24] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [25] DE Roo A, WESSELING C G, CREMERS N, et al. LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS[C]//Karel Kovar H P. Fifth European conference on application of geographic information systems in hydrology and water resources management. Vienna: IAHS, 1996: 395-403.
- [26] 杨才敏.晋西黄土丘陵沟壑区水土流失综合治理开发研究[M].北京:中国科学技术出版社,1995.
- [27] 霍贵中. 柠条在黄土丘陵沟壑区生态建设中的示范研究[J]. 山西水土保持科技, 2014(3): 36-37.
- [28] SHI Z H, FANG N F, WU F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 454 /455: 123-130.
- [29] 刘东生,安芷生,袁宝印.中国的黄土与风尘堆积[J].中国第四纪研究,1985(1):113-125.
- [30] 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集,水利电力出版社, pp81.
- [31] NEARING M A, NORTON L D, BULGAKOV D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33, 865-876.
- [32] ABRAHAMS A D, PARSONS A J, LUK S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing
 [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(6): 653-657.

— 746 —

- [33] 郭雨华,赵廷宇,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.
- [34] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001.
- [35] 肖培青,郑粉莉,姚文艺.坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J].水科学进展,2009,20(2): 236-240.
- [36] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J].农业工程学报, 2012,28(2):239-243.
- [37] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土坡面径流侵蚀产沙动力学过程模拟与研究[J].水科学进展,2006,17(4): 444-449.
- [38] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-78.
- [39] GABRIELS D. The effect of slope length on the amount and size distribution of eroded silt loam soils: short slope laboratory experiments on interrill erosion[J]. Geomorphology, 1999, 28(1/2): 169-172.
- [40] 雷廷武, M.A.Nearing. 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(11): 49-54.
- [41] 何继军,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): 90-96.

Characteristics of flow pattern and sediment transport processes on loessal soil slope in western Shanxi Province

FU Xingtao

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of flow pattern and sediment transport processes on loessal soil slope, western Shanxi province, Reynolds number, Froude number, runoff volume, sediment yield and sediment transport rate under different rainfall intensities and slope lengths were measured and analyzed based on the laboratory simulated rainfall events. The results indicate that flow pattern is basically laminar flow and torrential flow on slope lengths 1-5 m under 30-125 mm/h rainfall intensities. The flow pattern has significant impact on runoff erosivity, and there is a good power function relationship between sediment yield and the Reynolds number. Runoff turbulence is stronger with increasing rainfall intensity and slope length, and the sediment transport rate increases with these two factors. However, increment of sediment transport rate with slope length extending from 3 m to 4 m are less than that from 2 m to 3 m and 4 m to 5 m when rainfall intensity greater than 60 mm/h. The relationship between sediment transport rate and runoff volume can be described using power function. The conclusions can provide scientific basis for the control of soil and water loss as well as the construction of soil and water conservation measures on loess plateau slope.

Keywords: Loessal soil; slope length; rainfall intensity; flow pattern; sediment transport rate; runoff volume

(责任编辑:祁 伟)