

工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验

张翔¹, 高照良^{2,3}, 杜捷², 袁雪红³, 王凯³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 通过不同流量(35, 45, 55 L/min)、不同坡度(24°, 28°, 32°)的野外放水冲刷试验, 对工程堆积体坡面产流产沙的时空变化特性进行了研究。结果表明, 径流强度与放水强度、产沙率密切相关, 三者之间呈多元线性相关; 坡面径流强度随冲刷时间呈波动式增大趋势; 平均含沙量和产沙比均随坡度增大呈先增后减的趋势, 峰值出现在坡度为28°时; 径流强度和产沙率在冲刷时间为10 min时出现第一个峰值; 坡面产沙过程呈现产沙率剧增、波动和稳定发展3个阶段; 累计产沙量与累计径流量呈线性关系。试验结果可为工程堆积体坡面水土流失预报模型的构建提供验证数据。

关键词: 产流产沙; 工程堆积体; 放水冲刷; 径流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)04-0019-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2016.04.004

Field Experiment on the Characteristics of Runoff and Sediment Yield on Slopes of Engineering Accumulation Body

ZHANG Xiang¹, GAO Zhaoliang^{2,3}, DU Jie², YUAN Xuehong³, WANG Kai³

(1. College of Water Conservation and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100)

Abstract: A field water—scouring experiment was conducted with different flow rates (35 L/min, 45 L/min, 55 L/min) and different slope gradients (24°, 28° and 32°) in order to explore spatial—temporal characteristics of runoff and sediment yield on slopes of engineering accumulation body. The results showed that the runoff intensity was closely related to the intensity of discharge and sediment yield, and multiple linear correlations existed between them. The runoff intensity showed a fluctuated increasing trend with the increase of scouring time. Average sediment amount and sediment yield ratio increased at first and then decreased with the increase of slope gradients, and the peak value appeared when the slope gradient was about 28°. Runoff intensity and sediment yield showed the first peak values at 10 min. The sediment yielding process included 3 stages: sediment yield rapidly increase, fluctuated and steadily developed. The cumulative sediment yield showed linear correlation with the cumulative runoff. The experiment results may provide validation data for the prediction model of soil and water loss in the production and construction projects.

Key words: runoff and sediment yield; engineering accumulation body; scouring experiment; runoff

生产建设活动所产生的工程堆积体已成为生产建设项目新增水土流失最主要的泥沙策源地。特别是在短历时、高强度降雨条件下, 可能引发剧烈的土壤侵蚀^[1-2], 甚至产生生态灾难。坡面作为堆积体的基本构成单元, 是堆积体土壤侵蚀的重要贡献部分, 加上独特的下垫面组成, 使得其产流产沙过程与自然坡面迥异。因此, 探讨堆积体坡面的土壤侵蚀过程和

特性是预报其侵蚀量和采取针对性治理措施的前提与基础, 对确保堆积体安全稳定和生产建设区的良好生态环境具有重要的现实意义^[3]。

近年来, 生产建设项目弃土弃渣形成的工程堆积体水土流失问题越来越牵引着人们的视线, 也取得了不少的研究成果^[4-11]。王雪松等^[12]通过模拟人工降雨研究工程堆积体产流产沙特性表明, 堆积体坡面径

收稿日期: 2016-02-26

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题项目“农田水土保持关键技术与示范”(2011BAD31B01)

第一作者: 张翔(1991—), 男, 汉族, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail: 18165375822@163.com

通信作者: 高照良(1969—), 男, 汉族, 河南灵宝人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

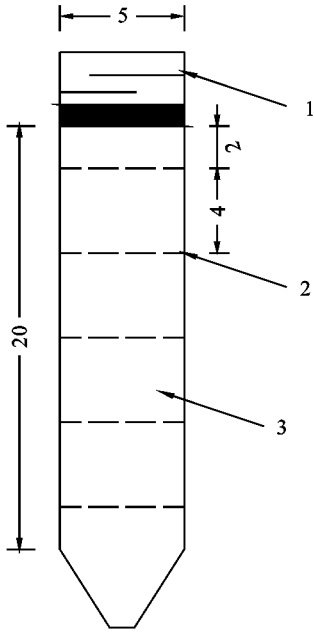
流含沙量随时间变化过程为“先增大一再小幅度减小一再稳定一再急剧减小一最后小幅度上升”的趋势,不同砾石含量堆积体的侵蚀速率在次降雨过程中主要经历“浮土冲刷”、“形成结皮”、“可蚀性泥沙减少”和“结皮破坏”4 个阶段,并表明降雨强度及砾石含量均能促进工程堆积体的坡面侵蚀^[13];史东梅等^[14]研究不同土石比的堆积体边坡径流侵蚀过程表明,放水流量是决定堆积体边坡侵蚀产沙的主要因素,而土石比是影响堆积体边坡侵蚀产沙的重要因素;李建明等^[15]研究表明,弃渣体采用鱼鳞坑及植被防护的减水效益为 29.5%~52.9%,减沙效益为 85.7%~97.9%,在坡度<25°时,石砾的存在增加了坡面径流路径弯曲度,从而延缓径流形成,有效的减少土壤侵蚀^[16];张乐涛等^[17]的研究表明,重力侵蚀对堆积体坡面径流含沙量的变化具有重要影响,试验条件下重力发挥作用的临界放水流量在 20~25 L/min 之间;坡面产沙过程存在产沙量的突变、波动变化和稳定发展 3 个阶段;史倩华等^[18]在模拟降雨条件下,分析了雨强及砾石含量对含砾石红壤工程堆积体坡面产流产沙过程的影响。目前,大多研究主要集中于自然坡面或坡耕地坡面,很少涉及野外工程堆积体陡坡面,对野外工程堆积体陡坡面产流产沙的时空变化特性的研究还比较少,不足以为不同类型的工程堆积体坡面防治措施的优化配置提供依据,也无法准确预测堆积体这独特下垫面的新增水土流失量。因此,选择野外工程堆积体陡坡面进行人工模拟径流冲刷试验显得尤为重要。本文通过不同坡度、不同流量的组合试验,对工程堆积体坡面产流产沙时空变化特性进行了研究,以期深入揭示堆积体坡面土壤侵蚀过程,为相关区域水土保持防治措施的布设提供参考,同时为生产建设项目中的水土流失预报模型构建提供数据支持。

1 试验场地与方法

1.1 试验场地

试验地位于陕西省长武县王东沟小流域内(35°14'34"N,107°41'31"E),该地区属暖温带半湿润、大陆性季风气候区,年均降水量 583.9 mm,年均气温 9.1℃。该区的地带性土壤属于黑垆土,土壤母质为深厚的中壤质马兰黄土,重力侵蚀严重,土壤侵蚀模数 1 860 t/km²,一年中降水多集中在 7—9 月份,占全年降水总量的 55%^[19]。试验小区建在人工开挖坡面上,开挖面达到土壤母质层,土壤母质为马兰黄土。小区所填土质来自边坡开挖所产生的弃土弃渣,事先清除杂草和有机残落物层,经现场机械开挖后进行人工回填,小区弃土弃渣为当年回填,坡面无任何植被覆盖,小区坡面投影长度 20 m,宽 5 m。堆积体表层土壤质地为砂壤土,土石比超过 9:1,粒径多在 1 mm 以

下,土壤颗粒粒径 0.2~0.1,0.1~0.05,0.05~0.02,0.02~0.01,0.01~0.005,0.005~0.002,<0.002 mm 含量依次为 0.3%,6.47%,32.95%,24.56%,10.57%,6.50%,18.65%。工程堆积体边坡坡度范围大多在 26°~35°之间^[20],因此设计试验坡度为 24°,28°,32°3 种。按照长武试验站 1 a 中发生的最大暴雨情况以及试验放水梯度,并结合前期的预放水试验,设置放水流量梯度为 35,45,55 L/min,分别相当于 0.3,0.4,0.5 mm/min 的降雨强度下产生的坡面径流量。采用模拟径流冲刷试验,用稳压水箱保持放水流量恒定,调节阀与水表配合进行率定流量,通过稳流槽获得平稳、恒定的出流(图 1)。



注:1 为溢流槽;2 为观测断面;3 为试验小区。

图 1 试验小区及放水装置示意

为控制土壤容重和含水率,对坡面进行平整,人工压实,并在试验开始前 24 h 对坡面进行均匀洒水,直到坡面即将产流为止,然后用塑料薄膜覆盖至试验开始。试验前土壤容重在 1.30~1.40 g/cm³ 范围内,土壤含水率在 10.5%~18.85%之间。每个小区设置 5 个测量断面,分别为距坡顶 2,6,10,14,18 m 处。在各断面观测的同时测定对应时刻的流速和流宽。坡面流速采用高锰酸钾染色示踪法测定,测距为 1.5 m,计算 5 个断面的平均流速;平均流速再乘以修正系数 0.75 作为坡面流平均流速^[21];流宽的测量采用自制的彩色测尺测定,精度为 1 cm,通过观测有水流彩色测尺进行准确的读数,然后计算出流宽。试验开始后,通过阀门和精密流量计控制流量,从小区有线状水流流出开始计时,每场次冲刷历时为 39 min,产流后 6 min 内每隔 2 min 用刻度尺测定 1 次集流桶内浑水深度,计算浑水总量,同时用 1 000 ml 泥样瓶在集流槽出口处收集泥沙样品,其后每隔 3

min 测定 1 次;试验结束后,测量坡面所产细沟的长、宽、深,用烘干法测定泥样瓶中的含沙量,试验土样采用激光粒度分析仪分析其机械组成。试验供水引自王东沟民用泉水井,经自流到蓄水桶。

1.2 数据分析方法

(1)泥沙样品处理:采用烘干法测定取样瓶中泥沙的质量。

$$S=\frac{G}{V} \tag{1}$$

式中: G 为泥沙质量(g); V 为浑水体积(ml); S 为含沙量(g/ml)。

(2)放水强度与径流强度(P 、 M):试验过程中任一时刻的放水强度与径流强度分别用该时段内放水流量及径流量在坡面平均过水面积上的平均径流深表示,放水流量为预设值,径流量为实测值,计算公式为:

$$P=\frac{D}{bL},M=\frac{V}{bLT} \tag{2}$$

式中: P 、 M 为放水强度及径流强度(mm/min); D 为放水流量(L/min); V 为观测时段内实测径流量(L); b 为某时段内的平均流宽(m); L 为坡长(20 m); T 为取样的时间间隔(min)。

2 结果与分析

2.1 堆积体坡面产流过程

坡面径流强度用来反映在不同径流量、流速及下垫面等因素影响下,径流对坡面物质冲刷程度及搬运能力的大小^[22]。不同坡度、不同放水流量条件下,坡面径流强度随放水时间的变化过程见图 2。

由图 2 可以看出,径流强度随时间的变化特征为:

(1)径流强度随时间呈波动式增大趋势,大流量的径流强度较小流量的波动性大,原因是随着冲刷历时的持续,入渗、蒸发等水量损耗因素逐渐趋于稳定,致使坡面径流量逐渐增大,相应的径流强度逐渐递增;在小流量时,径流强度较小,对应的径流侵蚀能力较小,侵蚀产沙量较小,坡面细沟发育也比较稳定,且坍塌主要发生在试验过程的中后期,因此径流强度前期呈现缓慢稳定的增长趋势,在试验的中后期才出现波动;大流量时,随着冲刷过程中由溯源侵蚀、重力侵蚀、下切侵蚀等作用的影响引起沟壁坍塌冲击沟内水流导致水面壅水、水深增大,即径流强度陡增,而后水流稳定,水深下降,如此周而复始,以致大流量下的径流强度较小流量时呈现的波动性更强烈。

(2)产流初期,不同坡度、不同流量条件下的径流强度均有不同程度的跳跃或突变,随着流量的增大,突变幅度递增,随着坡度的增加,径流强度的突变幅

度越来越小;在 24°和 32°坡度下,径流强度均在产流后 6 min 内陡增。在 28°坡度时,则在 4 min 左右出现了陡增,原因是在 4~6 min 左右正是面蚀结束而沟蚀开始之时,此时坡面径流开始汇集于细沟内,因此出现不同程度的突变,随着流量的增大,细沟内聚集的径流量也增大,相应的径流强度在此刻的突变幅度也增大,随着坡度的增加,径流的侵蚀力增强,使细沟不断向宽向深发展,致使此时径流强度随坡度增大而突变幅度却减小。

(3)不同流量、不同坡度条件下的径流强度均在 10 min 左右出现第一个波峰。原因是径流在 4~6 min 左右开始逐渐汇集在不断形成的细沟内,到 10 min 左右坡面分散水流几乎全部汇集在细沟内,此时细沟内径流量增大,出现第一个峰值。

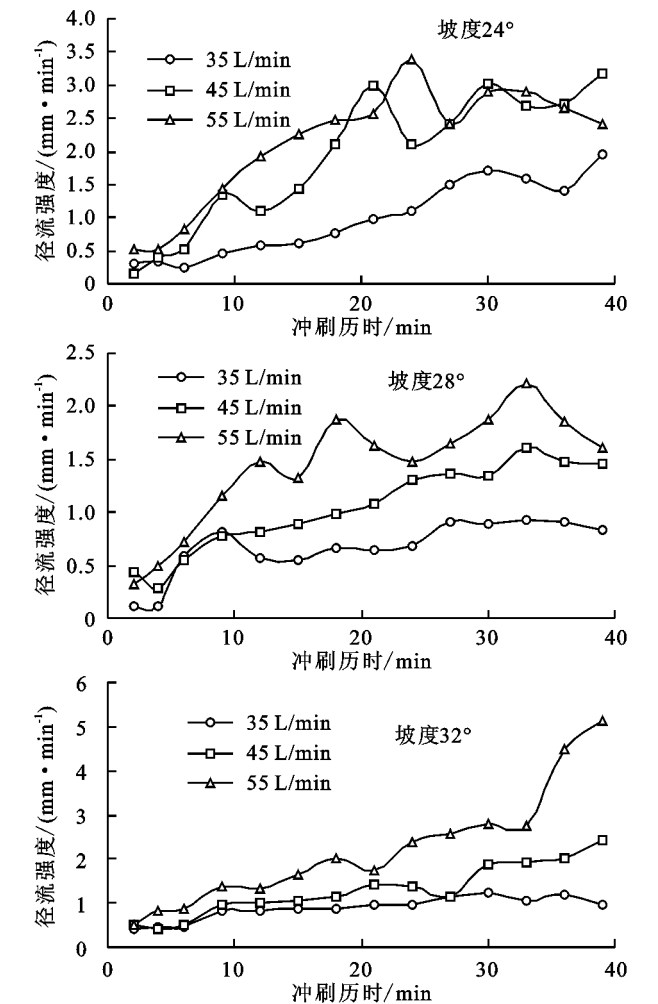


图 2 径流强度随时间变化

2.2 堆积体坡面产沙过程

2.2.1 径流含沙量变化过程 坡面径流含沙量是监测坡地水土流失状况的重要参数^[23-24]。拟合不同坡度、不同放水流量条件下径流含沙量随时间的变化过程见表 1。从表 1 可以看出,不同坡度、不同流量条件下,含沙量随冲刷历时的动态变化可用线性函数进行很好的拟合,堆积体坡面水流含沙量随冲刷历时的

增大而减少。原因是堆积体表面组成物质结构松散,抗蚀性极差的物质含量多,以致在产流初期含沙量很高。随着冲刷历时的持续,能被侵蚀的细颗粒物质不断减少,所以含沙量随历时的变化表现为不断减小。次径流过程中,平均含沙量随坡度的增大依次为0.367,0.493,0.401 g/ml,以悬移质含沙量>0.4 g/ml作为高含沙水流的标准^[25],试验条件下堆积体坡面流多属于高含沙水流。不同放水流量下,28°坡度的整体平均含沙量均高于对应的24°,32°坡度的径流含沙量,在28°坡度处出现临界点,表明平均含沙量随坡度增大的变化趋势发生改变的临界坡度在28°左右。

表 1 径流含沙量随时间变化的经验方程

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	经验 公式	可决 系数 R ²
24	35	$S=-0.0076t+0.541$	0.921
	45	$S=-0.0078t+0.485$	0.906
	55	$S=-0.0157t+0.692$	0.974
28	35	$S=-0.009t+0.826$	0.968
	45	$S=-0.008t+0.584$	0.741
	55	$S=-0.0077t+0.567$	0.884
32	35	$S=-0.007t+0.468$	0.976
	45	$S=-0.0148t+0.732$	0.968
	55	$S=-0.0098t+0.628$	0.871

注:样本数 N=14。

2.2.2 径流产沙率变化特征 坡面径流产沙率用来表征单位时间内径流侵蚀所产生的泥沙量,分析产沙率随冲刷历时的动态变化过程,有利于进一步了解工程堆积体坡面土壤侵蚀的动态过程。根据不同坡度、不同放水流量条件下各时段的产沙率,点绘坡面产沙率的散点图(图 3),表示产沙率随冲刷时间的变化特征。

分析图 3,可知堆积体边坡在试验条件下产沙过程大概可以概括为 3 个阶段:

第一,产沙率剧增阶段:随着放水流量的增大,产沙率剧增愈加明显且都发生在产流后 10 min 内,原因是径流初期坡面表层物质松散,沟蚀在此期间不断发生,溯源侵蚀、重力侵蚀、下切侵蚀等作用产生大量泥沙,且流量越大,流速也增大,径流切应力 τ 迅速增大,因此产沙量陡增,且随流量的增加而增大。

第二,产沙率的波动阶段:发生在冲刷过程的 10~30 min,随坡度的变化,不同的放水流量条件下表现出不一样的趋势,流量越大波动越剧烈。在 24°坡度下,35 L/min 流量时产沙率表现为稍微增加,在 45~55 L/min 流量时产沙率表现为波动式减小。在 28°坡度时,只有 55 L/min 流量下产沙率表现为波动式减小,其他均为微增的趋势。当坡度为 32°时,不同的流量下产沙率均为波动式减小趋势。在小坡度和低流量时,径流侵蚀力缓慢增加,细沟发育比较稳定,产沙率也没有剧烈的波动,且坍塌主要发生在试验过程的中后期,因此产沙率会随时间的变化在中后期出

现小幅度的增大趋势,当流量和坡度增大时,产流初期,径流剪切力比较大,细沟逐步形成过程中,不断发生溯源侵蚀、重力侵蚀、下切侵蚀等现象,以致在 10 min 左右开始出现大量的坍塌,产沙率迅速的增大,且波动性很强,但到了试验的中后期,偶尔出现坍塌现象,因此产沙率随时间出现波动性减小的现象。从图 3 还可看出,不同坡度、不同流量条件下,产沙率均在 10 min 左右出现波动的第 1 个波峰,结合径流强度也在 10 min 左右出现第 1 个峰值,可知此时的径流侵蚀力最大,发生沟壁坍塌现象,不难得出此处有 1 个产沙率的峰值。因此,也可通过产沙率的峰值反推沟壁坍塌在整个试验过程中发生的时刻以及次数。

第三,产沙率的稳定发展阶段:此阶段细沟发育成熟,径流侵蚀力达到稳定,坡面产沙率也达到稳定。

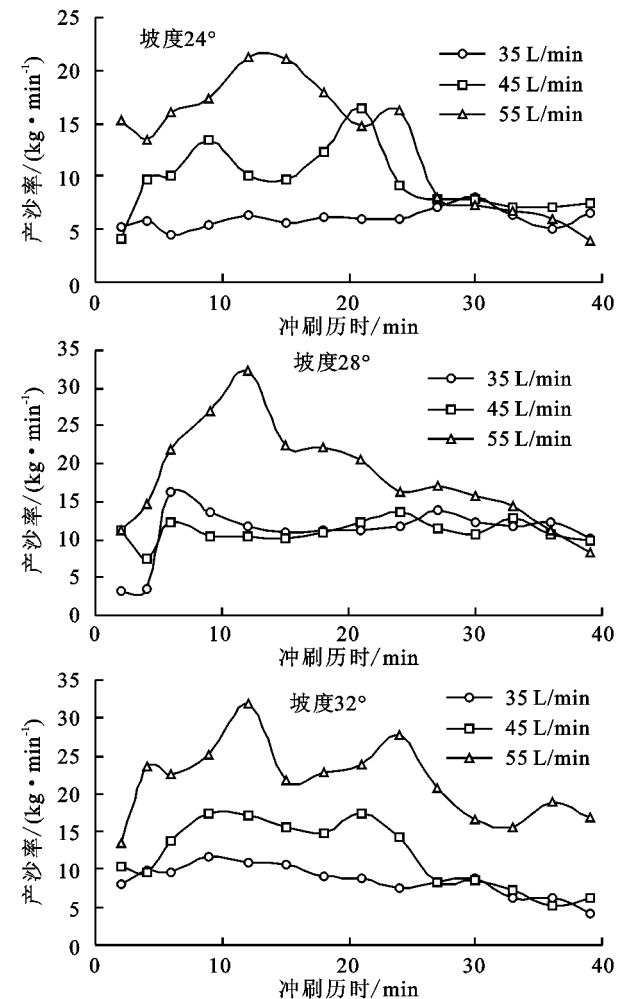


图 3 不同放水条件下的产沙过程

2.2.3 不同坡段径流产沙比 试验结束后沿坡长方向按照距坡顶 0~5,5~10,10~15,15~20 m 的长度将坡面分为 4 个区段,用段 1、段 2、段 3、段 4 分别表示,代表不同坡位。利用容积法^[26]即计算细沟体积乘以土壤容重进而近似得到不同坡段内的细沟侵蚀量,计算公式为:

$$M_i=B_i\times H_i\times l_i\times\rho\tag{3}$$

式中: M_i 为任一选定坡段内土壤侵蚀量(kg); B_i 为选定坡段内细沟平均宽度(m); H_i 为选定坡段内细沟平均深度(m); l_i 为选定坡段内细沟长度(m); ρ 为土壤干容重(kg/m³)。

在试验坡度和流量条件下,不同坡段上的细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的百分比情况见图 4。分析图 4 得到坡面堆积体不同坡段的产沙量特征:

第一,不同坡度、不同流量下各区段细沟侵蚀量所占百分比不尽一致,坡段侵蚀量沿水流方向呈现递减的趋势,即区段 1 内产生的细沟侵蚀量所占总细沟侵蚀量的百分比最大,均在 40%~90%内。原因是在径流冲刷过程中,区段 1 受到径流的冲刷最严重,必然产生最大的侵蚀量,随着跌坎的形成及其消能作用开始发挥,水流沿着坡面往下的动能减小,侵蚀作用减弱,以致中下坡段的细沟侵蚀量所占总细沟侵蚀量的比例逐渐减小甚至没有产生细沟。

第二,在同一坡度下,随着放水流量的增加,段 1 内的细沟侵蚀量占总细沟侵蚀量的比例呈现出逐渐减小的趋势,且坡面细沟侵蚀分布也越来越均匀。原因是在流量增大时,由于水流流速较大,具有较大动能、侵蚀力的水流快速均匀地分布在整个坡面上,使得各个区段均有一定的细沟侵蚀量,因此区段 1 内的细沟侵蚀量占总侵蚀量的比例随着流量的增大才出现减小的趋势。

第三,区段 1 的细沟侵蚀量所占总细沟侵蚀量的平均百分比随着坡度的增大是先增后减的,28°坡面的区段 1 内细沟侵蚀量占总细沟侵蚀量的百分比均达到 80%以上,这与平均含沙量在此坡度下达到最大值是一致的。这同样是因为在 28°左右存在临界坡度,使区段 1 的侵蚀量随坡度变化的趋势发生了改变。

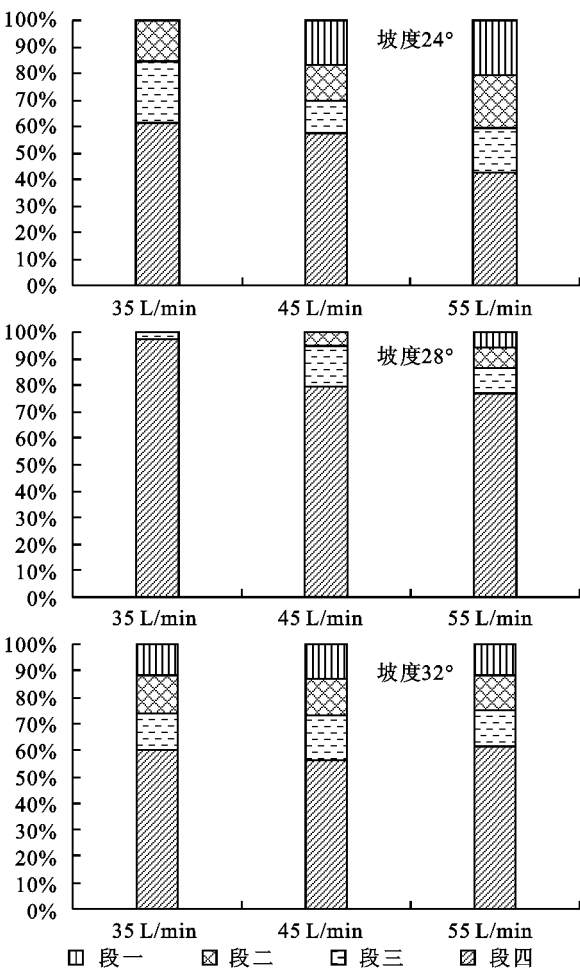


图 4 堆积体坡面不同坡段的产沙量

2.3 堆积体坡面水、沙关系

2.3.1 径流强度与各因素的相关关系 影响径流强度的主要参数包括观测时段内的放水强度、时段径流量、放水量、含沙量、时段产沙量、水流宽度、产沙率、时间等,利用 SPSS 17.0 分析各因子对径流强度的相关关系见表 2。

表 2 径流强度与各因子相关分析结果

因素	放水流量	含沙量	时段径流量	时段产沙量	放水强度	水流宽度	时间	产沙率
径流强度	0.485**	-0.652**	0.812**	0.324**	0.838**	-0.61**	0.652**	0.189**

注:表中 * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; $N=126$ 。

由表 2 可知,放水强度与径流强度具有显著相关性,产沙率对径流强度的影响最低,径流强度表示时段径流量在坡面平均过水面积上的平均径流深,放水强度表示放水流量在坡面平均过水面积上的平均径流深,产沙率为不同时刻坡面产沙速率,用放水强度 P 及产沙率 S_y 对径流强度 M 进行多元线性回归拟合,通过回归分析得表 3,建立经验方程式为:

$$M=1.465P+0.04S_y-1.101$$

$(R^2=0.776,N=126)$ (4)

通过控制其他相关因素,对放水强度与产沙率进行偏相关分析, P 、 S_y 间的偏相关系数为 0.008, sig=

0.928>0.05,说明 P 、 S_y 相关性不显著,表明因子的选择是合理的。 T 检验 sig<0.001,说明 P 、 S_y 对 M 具有极显著性影响, F 检验 sig<0.001,表明回归方程显著,方程(4)拟合效果较好。

2.3.2 累计径流量与累计产沙量的关系 为从总量上进一步揭示工程堆积体坡面细沟水沙关系特性,拟合不同坡度、不同流量条件下累计产沙量与累计产流量的变化过程(表 4)可知,累计产沙量与累计径流量呈线性正相关关系,表明累计产沙量是随着累计径流量的增大而增大的。 F 检验 sig<0.001,二者相互关系极显著,方程拟合效果较好,这结论与蔡强国等^[27]的试验结果一致。

表 3 径流强度回归分析

自变量	回归 系数	均方差	标准化 系数	T 值 检验	单因子 显著性	F 值 检验	回归方程 显著性	复相关 系数 R
P	1.465	0.073	0.864	20.135	<0.001	212.555	<0.001	0.881
S_y	0.040	0.006	0.271	6.307	<0.001			

表 4 累计产沙量与累计径流量关系的经验方程

坡度/(°)	拟合公式	可决系数 R^2
24	$S_a=0.348Q+25.214$	0.947**
28	$S_a=0.404Q+44.980$	0.952**
32	$S_a=0.409Q+22.521$	0.949**

注:表中 * 表示 ($P<0.05$); ** 表示 ($P<0.01$); 样本数 $N=42$ 。

3 结论与讨论

在本研究试验坡度和流量条件下,径流强度在径流初期出现剧增的时间节点与 Zhang 等^[21]的试验结果比较接近。

径流强度随时间的变化呈波动式增大趋势,产流初期,不同流量、不同坡度条件下的径流强度均有不同程度的突变,随着流量的增大,径流强度的突变幅度递增,随着坡度的增加,径流强度的突变幅度有所下降。

含沙量随冲刷历时的动态变化过程能用线性方程很好的描述;含沙量随时间的增大递减。产沙率随冲刷历时的变化包含 3 个阶段:剧增阶段、波动阶段和稳定发展阶段;不同坡段的细沟侵蚀量沿水流方向呈逐渐减小的趋势,且在区段 1 内细沟侵蚀量占坡面总细沟侵蚀量的比例最大;不同坡度下,随着放水流量的增加,区段 1 内的细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的比例逐渐减小。

通过分析径流强度、含沙量随坡度的变化以及不同坡段产沙分布随坡度的变化,均可得出在 28°左右存在临界坡度的结论。不同流量、不同坡度条件下,径流强度和产沙率均在 10 min 左右出现第 1 个峰值。

通过分析堆积体坡面的水、沙关系,可知径流强度可用放水强度和产沙率进行很好的回归方程拟合;累计产沙量与累计径流量之间呈二次函数关系。

参考文献:

[1] 赵晓光. 黄土高原细沟产生的动力基础分析[J]. 中国水土保持, 2003(8):16-17.

[2] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报, 2013,50(2):281-288.

[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(2):159-165.

[4] Wolman M G, Schick A P. Effects of construction on fluvial sediment, urban and suburban areas of Maryland [J]. Water Resources Research, 1967,3(2):451-464.

[5] Morgan R P C, Quiton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic ap-

proach for predicting sediment transport from field and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998,24(6):567-568.

[6] Meyer L D, Wischmeier W H, W H Daniel. Runoff and revegetation of denudad construction sites: Transaction of the ASAE[J]. Erosion, 1971,14(1):138-141.

[7] Donjatee S, Clemente R S, Tingsanchali T, et al. Effects of vertical hedge interval of vetiver grass on erosion on steep agricultural lands[J]. Land Degradation and Development, 2010,21(3):219-227.

[8] 赵暄,谢永生,王允怡,等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2013,27(3):1-7.

[9] 倪含斌,张丽萍,张登荣. 模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失[J]. 环境科学学报, 2006,26(12):2065-2071.

[10] 王文龙,李占斌,李鹏,等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J]. 水土保持学报, 2004,18(5):68-71.

[11] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等. 工程堆积体坡面工程措施减流减沙效应的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015(5):862-866.

[12] 王雪松,谢永生,陈曦,等. 模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J]. 泥沙研究, 2015(4):74-80.

[13] 王雪松,谢永生,陈曦,等. 砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响[J]. 泥沙研究, 2015(1):67-74.

[14] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等. 不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2015,31(17):152-161.

[15] 李建明,王文龙,王贞,等. 神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验[J]. 应用生态学报, 2013,24(12):3537-3545.

[16] 李建明,王文龙,黄鹏飞,等. 黄土区生产建设工程堆积体石砾对侵蚀产沙影响[J]. 泥沙研究, 2014(4):10-17.

[17] 张乐涛,高照良,李永红,等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013,29(8):145-153.

[18] 史倩华,王文龙,郭明明,等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J]. 应用生态学报, 2015,26(9):2673-2680.

[19] 李晓春,孟全省. 黄土高原沟壑区小流域生态与经济要素演变及相互作用:以陕西省长武县王东沟小流域为例[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2008,8(3):9-13.

[20] 赵暄,谢永生,景民晓,等. 生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J]. 水土保持学报, 2012,26(5):229-234.