

高边坡工程堆积体产流产沙特性研究

张少佳¹, 高照良^{1,2}, 李永红², 张乐涛¹, 刘子壮³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 工程堆积体在强降雨条件下极易发生严重的水土流失, 成为某些建设项目主要的水土流失来源。为了系统揭示高边坡工程堆积体的土壤侵蚀特点, 在建设的3个坡度(24°, 28°和32°)、宽5 m、坡长20 m的小区上进行放水冲刷试验。结果表明, 产流量、产沙量与放水流量、坡度之间存在线性正相关关系, 即随着放水流量、坡度的增大, 产流量、产沙量在不断增大。临界产流放水流量和临界产沙放水流量均说明工程堆积体下渗强烈。由于下渗强烈, 流量较小时(30 L/min), 坡度对产流量的影响不明显。试验条件下产流量和产沙量存在密切的幂函数关系, 具体表达式是 $M_s = 0.560W^{0.886}$ 。

关键词: 放水冲刷试验; 高边坡; 工程堆积体; 产流产沙

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)02-0107-04

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.02.019

Study on Characteristics of Runoff and Sediment Yield on Steep Slope of Engineering Accumulation Body

ZHANG Shaojia¹, GAO Zhaoliang^{1,2}, LI Yonghong², ZHANG Letao¹, LIU Zizhuang³

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

Abstract: Engineering accumulation bodies are prone to serious soil erosion under heavy rainfall and other conditions, which becomes a major source of soil erosion in some construction projects. In order to systematically discover the characteristics of soil erosion on steep slope of engineering bodies, scouring experiments were carried out on steep slopes of engineering bodies, with 3 slope gradients (24°, 28° and 32°), 5 m of slope width and 20 m of slope length. Through these experiments, we found that runoff and sediment yield showed positive linear relationships with drainage flow and slope gradient. With the increases of drainage flow and slope gradient, runoff and sediment yield also increased. Critical drainage flow rates of runoff and sediment yielding indicated the strong infiltration of engineering accumulation body. Due to the strong infiltration, when the drainage flow was small (30 L/min), effect of slope gradient on runoff yield was not obvious. There was a significant power function relationship between runoff and sediment yield under test conditions, and the expression was $M_s = 0.560 W^{0.886}$.

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

由于区域经济建设的需求, 近些年来黄土高原地区实施了越来越多的开发建设项目, 如高速公路的建设, 煤矿、石油等自然资源的开采等^[1]。开发建设项目所形成的工程堆积体在强降雨等条件下极易发生严重的水土流失而破坏生态环境, 因此受到了越来越广泛的关注^[2]。工程堆积体水土流失严重的主要原因是土体结构遭到破坏, 而且前期土壤肥力条件差缺少植被覆盖, 同时缺乏有效的水土保持措施防护。因此研究工程堆积体在次径流过程中的产流产沙特性, 可以揭示径流对工程堆积体边坡的冲刷规律, 为有效的水土保持措施布设提供参考依据^[3]。野外放水冲

刷试验为揭示工程堆积体产流产沙特性提供了有效的途径, 但是由于坡度大、野外观测条件差等原因造成不同学者进行试验时所采用的小区尺寸并不统一, 因此导致试验结果存在一定的差异^[4-5, 7-9]。为此建设了尺寸统一的小区进行放水冲刷试验, 期望系统地揭示次径流过程中工程堆积体产流产沙特性, 为工程堆积体土壤侵蚀预测提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

长武县境内地层基底是巨厚的中生界沉积沙页岩, 自下而上为三迭系、侏罗系、白垩系, 基底之上依次

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家“十二五”农村领域科技计划项目“农田水土保持关键技术研究示范”(2011BAD31B01)

第一作者: 张少佳(1987—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zsjia8766@163.com

通信作者: 高照良(1969—), 男, 河南灵宝人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

覆盖着新生代第三系三趾马红土、第四系午成黄土、离石黄土和马兰黄土。长武县塬川相间,沟谷发育,属渭北典型的黄土高原沟壑地貌类型^[6]。长武地域土壤成土母质为第四纪黄土,主要有 3 类土壤:黑垆土、黄土性土、红土类土壤,分别占 32.6%,47.4%,16.8%,其余为河淤土和潮土,分别占 3.1%和 0.1%。全县年均气温为 9.1℃,年均无霜期 171 d,年均冻土深度为 35 cm 左右。长武处于西北内陆腹地,属暖温带半湿润、大陆性季风气候区,同时受黄土高原地形和海拔高度影响,形成垂直气候特点。全县年际平均降水量为 587.8 mm,最多降水 813.2 mm,最少降水 369.5 mm。降水集中在 7—9 月,占年总降水量的 54.9%。境内水土流失剧烈,土壤侵蚀模数为 6 500 (t/km²·a),属强度土壤流失区。

1.2 试验布设与方法

试验小区布设于陕西省长武县中国科学院长武试验基地王东沟小流域内的一处弃土场上,采用野外放水试验模拟径流对初期工程堆积体边坡的冲刷过程。根据该区暴雨发生频率在试验小区产生的单宽流量和前期试验结果,设定 4 种放水流量(30,40,50,

60 L/min)来代表不同的水动力条件。试验小区宽 5 m,坡长 20 m,设计 3 个坡度(24°,28°和 32°)。供水设备为 1 个保持水位恒定的恒压桶,安置于高出试验小区顶端 2~3 m 处的位置,利用贮水桶给恒压桶提供持续水源。采用定水头控制流量,通过阀门调节流量。每次试验前,率定放水流量 2~3 次,确保放水流量与设计要求误差不超过 5%。在小区顶端设置 1 个与小区等宽的溢流槽,以使放水经缓冲后以薄层水流的形式均匀地流入小区,在小区下方设置收集含沙水流的集流槽与集流桶,通过集流桶水位变化来计算不同时间段的径流量。试验开始前,采用“S”形布点方式在小区采集 10 个土样,以测定土壤容重和土壤前期含水量,试验条件下土壤容重变化范围是 1.14~1.54 g/ml,土壤前期含水量变化范围是 10.39%~21.50%。试验从产流开始,持续进行 30 min。产流 6 min 内每隔 2 min 取 1 次径流泥沙样,6 min 后每隔 3 min 取 1 次径流泥沙样,试验后采用比重瓶法测定泥沙量。采用染色剂示踪法测定坡面流流速。试验用土为黑垆土和黄土性土的混合,对采集土样的土壤颗粒组成进行分析,其颗粒组成见表 1。

表 1 试验用土的土壤颗粒组成

粒径/mm	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
组成/%	8.42	21.76	33.07	19.33	6.61	2.17	8.64

2 结果与分析

2.1 产流产沙与放水流量的关系

产流产沙与放水流量的关系反应了工程堆积体在不同水动力条件下产流产沙的变化特性^[7]。图 1 反映了产流量随放水流量的变化和产沙量随放水流量的变化。对产流量~放水流量、产沙量~放水流量进行回归分析后将得到的回归方程列于表 2 中。从图 1 和表 2 可以看出,试验条件下产流量与放水流量、产沙量与放水流量均呈现线性正相关关系,且随着坡度的增大,产流产沙量均在增大。令表 2 回归方程中产流量和产沙量为 0,可以得到临界产流放水流量和临界产沙放水流量。试验条件下,临界产流放水

流量在 19.29~27.13 L/min 之间,临界产沙放水流量在 11.96~23.48 L/min 之间,说明工程堆积体下渗强烈,主要原因是土体整体结构松散,水分很容易沿堆积体内的裂隙向下入渗。去掉坡度影响,分别建立产流量、产沙量与放水流量之间的关系式为式(1)和(2):

$$W = 44.27(Q - 23.20) \quad n = 12 \quad R^2 = 0.907 \quad (1)$$

$$M_s = 8.45(Q - 17.61) \quad n = 12 \quad R^2 = 0.714 \quad (2)$$

式中:W 为产流量(L);M_s 为产沙量(kg);Q 为放水流量(L/min)。

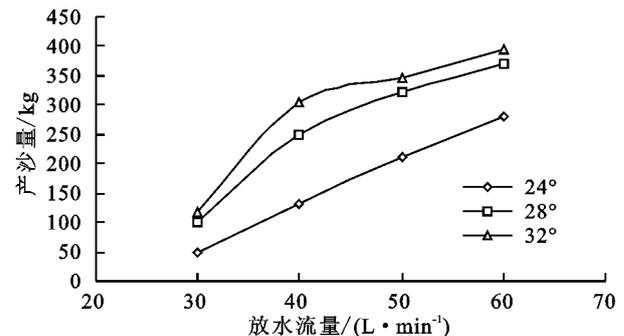
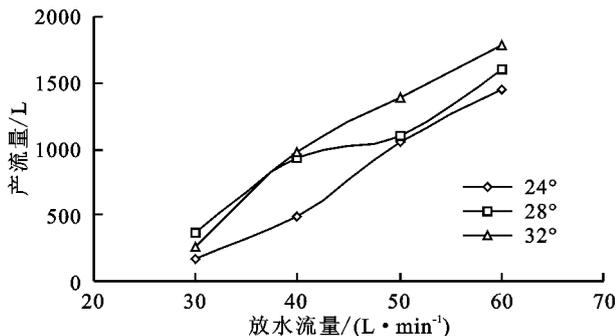


图 1 产流产沙随放水流量的变化

2.2 产流产沙与坡度的关系

坡度是影响土壤流失的重要因子,因此建立坡度

与产流产沙的关系至关重要^[8-9]。根据试验资料,分别点绘了产流量随坡度的变化和产沙量随坡度的变

化(图 2)。分别建立产流量~坡度、产沙量~坡度之间的关系式列于表 3 中。发现在 30 L/min 放水流量下,产流量与坡度的线性关系并不明显,原因是放水

流量自身较小且小区下渗强烈,导致不同坡度下收集到的产流量差别并不大;在其他流量下,产流量与坡度、产沙量与坡度均存在较好的线性关系。

表 2 产流产沙与放水流量的关系

坡度/ (°)	产流量~放水流量/ W-Q	样本数 n	相关系数 R ²	坡度/ (°)	径流量~放水流量/ M _s -Q	样本数 n	相关系数 R ²
24	W=44.19(Q-27.13)	4	0.989	24	M _s =7.74(Q-23.48)	4	0.998
28	W=38.85(Q-19.29)	4	0.966	28	M _s =8.79(Q-15.38)	4	0.934
32	W=49.76(Q-22.76)	4	0.977	32	M _s =8.82(Q-11.96)	4	0.866

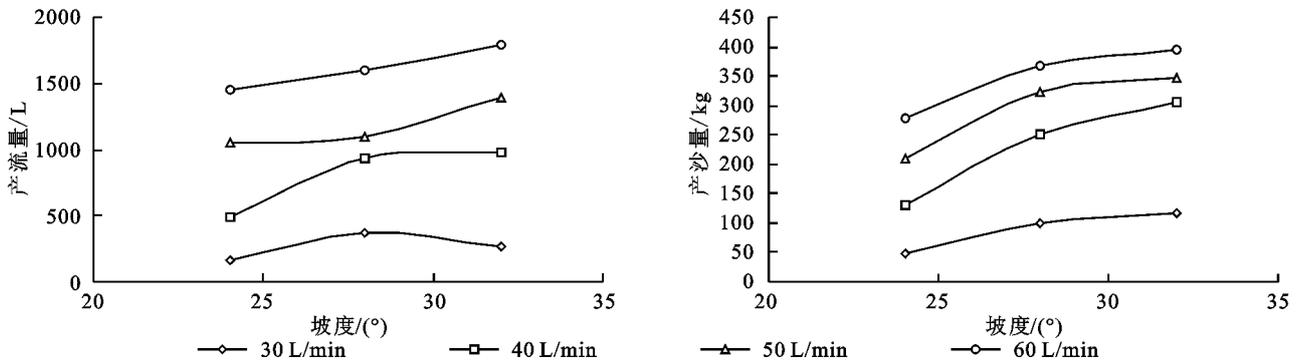


图 2 产流产沙随坡度的变化

表 3 产流产沙与坡度的关系

放水流量/ (L · min ⁻¹)	产流量~坡度/ W-S	样本数 n	相关系数 R ²	放水流量/ (L · min ⁻¹)	产沙量~坡度/ M _s -S	样本数 n	相关系数 R ²
30	W=12.27S-76.58	3	0.250	30	M _s =8.87S-154.62	3	0.913
40	W=62.05S-939.34	3	0.832	40	M _s =21.78S-381.64	3	0.959
50	W=41.72S+11.40	3	0.855	50	M _s =17.27S-190.32	3	0.882
60	W=42.22S+433.28	3	0.996	60	M _s =14.66S-62.23	3	0.913

2.3 产流量与产沙量的关系

产流量与产沙量的关系是次径流过程中水沙关系的一种简单直观描述^[10-11]。点绘产流量与产沙量的关系曲

线(图 3)。由图 3 可以看出,试验条件下产流量与产沙量之间存在明显的线性相关关系,即随着产流量的增大,产沙量在不断增大,符合水大沙大的基本理论^[12-13]。

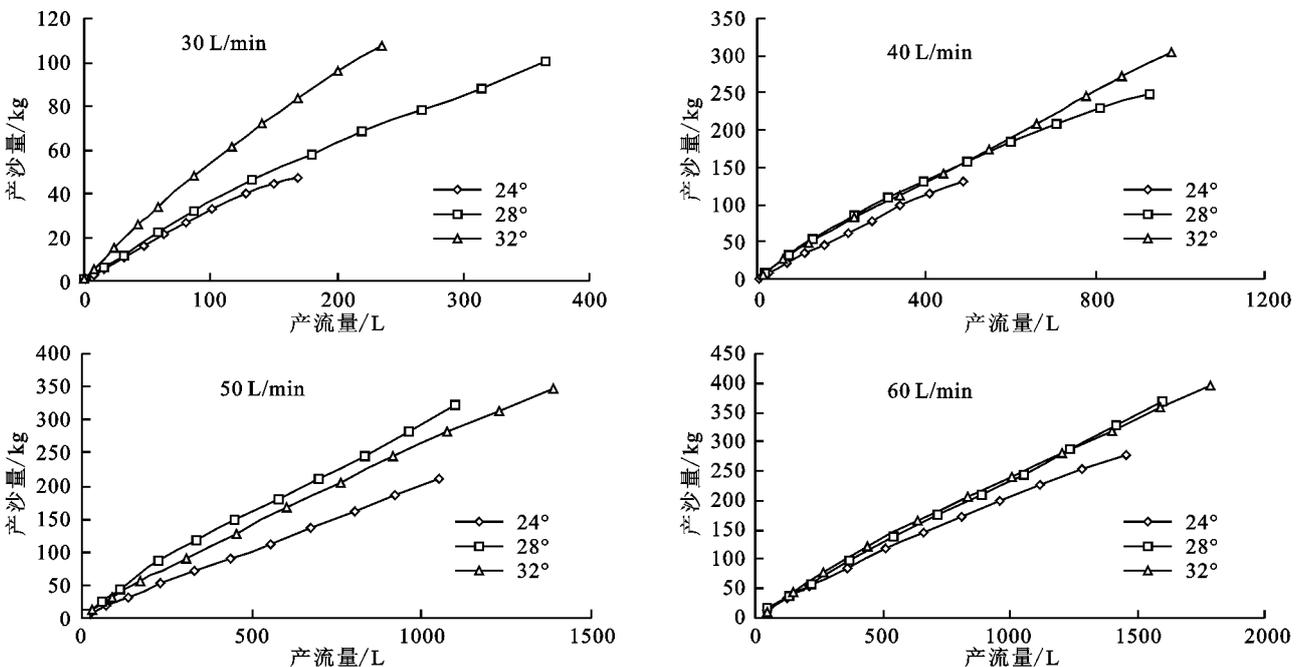


图 3 各放水流量下产流量和产沙量的关系

分别建立各个坡度、各个放水流量下产沙与产流的关系式列于表 4 中。由表 4 可以看出,试验条件下,

产流~产沙关系均可以用幂函数 $y = a \cdot x^b$ 进行描述^[14-16]。试验条件下 a 值变化范围是 0.275~0.766,b

值变化范围是 0.860~0.992, 相关系数 R^2 的变化范围是 0.988~1.000。各个试验条件下的 b 值都 < 1, 说明产沙速率在试验后期有所减小; 然而 b 值却都接近于 1, 说明了整个试验过程中产沙速率变化并不大, 即试验时间(30 min)内小区的侵蚀速率基本维持在同一水平, 说明了工程堆积体由于整体结构松散而易发生大量水土流失的特点。不考虑放水流量和坡度的影响, 试验条件下产流产沙的幂函数关系为:

$$M_s = 0.560W^{0.886}$$

$$n = 132 \quad R^2 = 0.978 \quad (3)$$

表 4 不同试验条件下产流产沙关系

坡度/ (°)	放水流量/ (L·min ⁻¹)	产沙~径流关系 / $M_s - W$	样本数 n	相关系数 R^2
24	30	$M_s = 0.399W^{0.986}$	11	0.998
28	30	$M_s = 0.580W^{0.883}$	11	0.999
32	30	$M_s = 0.766W^{0.920}$	11	0.999
24	40	$M_s = 0.300W^{0.992}$	11	1.000
28	40	$M_s = 0.750W^{0.860}$	11	0.998
32	40	$M_s = 0.648W^{0.890}$	11	1.000
24	50	$M_s = 0.381W^{0.903}$	11	1.000
28	50	$M_s = 0.633W^{0.892}$	11	0.999
32	50	$M_s = 0.603W^{0.879}$	11	1.000
24	60	$M_s = 0.465W^{0.882}$	11	1.000
28	60	$M_s = 0.446W^{0.909}$	11	1.000
32	60	$M_s = 0.275W^{0.982}$	11	0.988

3 讨论

本试验依据较为成熟的产流产沙理论知识为基础^[17-18], 将其运用到开发建设项目所产生的工程堆积体中, 充分考虑了实际生产建设中工程堆积体坡长较长、坡度较陡的特点, 探索了不同坡度下的工程堆积体的产流产沙特性。试验结果表明: 工程堆积体下渗较为强烈, 临界产流放水量与临界产沙放水量均较高; 堆积体整体结构松散, 产流产沙幂函数关系密切, 上方来水易引发坡面产生大量水土流失。这些结论可作为开发建设项目工程堆积体水土流失预测和水土保持措施布设的参考, 确保水土保持措施安全有效, 达到因害设防的目的。本试验存在的不足主要是重复次数较少, 相关结论及重力侵蚀对本试验的影响有待进一步论证。

4 结论

放水冲刷试验条件下工程堆积体的产流产沙特性存在以下特点:

(1) 产流量、产沙量与放水流量之间存在较好的线性正相关关系, 即随着放水流量的增大, 产流量、产沙量均在增大。关系表达式分别是 $W = 44.27(Q - 23.20)$, $M_s = 8.45(Q - 17.61)$, 说明工程堆积体下渗强烈。

(2) 坡度是影响土壤侵蚀的重要因子, 产流量、产沙

量与坡度呈线性正相关关系, 及随着坡度的增大, 产流量、产沙量均在增大。当流量较小时(30 L/min), 由于下渗强烈, 导致坡度对产流量的影响并不明显。

(3) 产流产沙关系直观描绘了工程堆积体的水沙关系。试验条件下, 产流量和产沙量存在非常密切的幂函数关系, 具体表达式是 $M_s = 0.560W^{0.886}$ 。幂函数回归方程的指数和相关系数的变化特征说明工程堆积体易发生大量水土流失。

参考文献:

- [1] 黄自强. 黄土高原水土保持近期方略[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 82-85.
- [2] 张绒君, 王晓, 段菊卿. 线形开发建设项目的土壤侵蚀与工程防治[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 139-141.
- [3] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 34-38.
- [4] 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.
- [5] 王文龙, 王兆印, 李占斌, 等. 神府东胜煤田开发中扰动地面径流泥沙模拟研究[J]. 泥沙研究, 2006(2): 60-64.
- [6] 长武县志编纂委员会. 长武县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.
- [7] 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.
- [8] 周佩华, 郑世清, 吴普特, 等. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究[J]. 水土保持研究, 1997(S1): 47-58.
- [9] 肖培青, 史学建, 陈江南, 等. 高速公路边坡防护的降雨和径流冲刷试验研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1): 16-18.
- [10] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 9-15.
- [11] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567-574.
- [12] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882-886.
- [13] Yang C T. Unit stream power and sediment transport [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1972, 98(10): 1805-1826.
- [14] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228.
- [15] 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 40-44.
- [16] 丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J]. 泥沙研究, 2010(6): 16-22.
- [17] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 66-69.
- [18] 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.