

# 坡长对黄土区工程堆积体产流产沙影响的模拟试验研究

李玉亭<sup>1</sup>, 高照良<sup>1,2</sup>, 李永红<sup>1</sup>, 齐星圆<sup>1</sup>, 张翔<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 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. 萍乡学院, 江西 萍乡 337000)

**摘要:** [目的] 探究坡长对黄土区工程堆积体产流产沙的影响, 为生产实践中工程堆积体水土流失合理防控提供理论依据和技术支撑。[方法] 在裸露的堆积体边坡上选取 3 个坡度(24°, 28°, 32°) 5 个坡长(4, 8, 12, 16, 20 m) 进行野外模拟径流冲刷试验。[结果] 24°, 28°, 32° 坡面产流率和产沙率均随坡长的增加持续波动; 4 和 8 m 处坡面的产流率和产沙率之间相关性显著, 12, 16 和 20 m 处坡面的产流率和产沙率间只有在 32° 时相关性显著; 累积产流量和累积产沙量均随坡长增加而增大且符合幂函数关系; 累积产沙量与累积产流量之间具有线性函数关系。[结论] 坡长对坡面产流率和产沙率的影响因坡度而存在差异性; 累积产流量、产沙量均随坡长的增加而增加。

**关键词:** 工程堆积体; 坡长; 产流产沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0102-05

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 李玉亭, 高照良, 李永红, 等. 坡长对黄土区工程堆积体产流产沙影响的模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 102-106. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 04. 016; Li Yutingting, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Effects of slope length on runoff and sediment yield of engineering accumulation body in loess area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 102-106.

## Effects of Slope Length on Runoff and Sediment Yield of Engineering Accumulation Body in Loess Area

Li Yutingting<sup>1</sup>, Gao Zhaoliang<sup>1,2</sup>, Li Yonghong<sup>1</sup>, Qi Xingyuan<sup>1</sup>, Zhang Xiang<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, North A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337000, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of slope length on the runoff and sediment yield of the engineering accumulating body were studied in order to provide theoretical basis and technical support for the reasonable prevention and control of soil and water loss in engineering accumulations in production practice. [Methods] Three slope (24°, 28°, 32°) and five slope length (4, 8, 12, 16, 20 m) were selected for simulated field test of runoff erosion on exposed engineering accumulating body. [Results] The runoff rate and sediment yield of 24°, 28° and 32° slopes fluctuated with the increase of slope length. The correlation between the runoff rate and the sediment yield of the 4 m and 8 m slopes was significant, the correlation between the runoff rate and the sediment yield of the slope at 12, 16 and 20 m was only significant at 32°. Cumulative flow rate and cumulative sediment yield had a power function relationship with slope length. The cumulative sediment yield and cumulative yield had a linear function relationship. [Conclusion] The influence of slope length on slope runoff rate and sediment yield was different due to different slope; cumulative runoff and sediment yield increased with slope length.

**Keywords:** engineering accumulation body; slope length; runoff and sediment yield

收稿日期: 2018-12-14

修回日期: 2019-03-19

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划项目“高塬沟壑区固沟保塬生态防护与苹果产业提质增效技术及示范”(2016YFC0501706-02); 国家自然科学基金项目“工程堆积体陡坡坡面径流侵蚀输沙动力过程试验研究”(41671283)

第一作者: 李玉亭(1994—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为工程建设区土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 396342235@qq.com。

通讯作者: 高照良(1969—), 男(汉族), 河南省灵宝市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治方面的研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn。

工程堆积体是由生产建设项目产生的弃土弃渣堆置而形成的具有特殊结构的人工“再塑”地貌单元,具有结构松散,抗冲性差、坡度较陡,植被缺乏等特性,是生产建设项目新增水土流失的最主要单元<sup>[1]</sup>。尤其是在短历时强降雨条件下,极易发生水土流失危害,甚至导致滑坡泥石流等严重灾害<sup>[2-3]</sup>。近20 a来,随着社会经济的快速发展和开发建设项目的不断增多,产生了数量巨大的工程堆积体,造成了严重的水土流失隐患,引起了社会各界的广泛关注<sup>[4]</sup>。已有学者对坡长与产流产沙之间的关系进行研究,主要结论有3种,第一种认为产流产沙随坡长的增加而增大,第二种认为产流产沙随坡长的增加先增加后减小,第三种认为产流产沙随着坡长的增加不断波动。其中蔡强国等人<sup>[5]</sup>发现径流及侵蚀产沙量随着坡长的增大而增大,且超过某一临界坡长后累积侵蚀模数与降雨历时非线性变化;郭新亚等人<sup>[6]</sup>研究认为坡面产流量随坡长的增大先减小后增加再减小,产沙量随坡长的增大线性增加;Kinnell等<sup>[7]</sup>研究表明含沙量与坡度及坡长均具有相关性,特别是坡度超过 $10^\circ$ 时坡长对含沙量的影响更加明显;Agassi等<sup>[8]</sup>的研究结果显示,10 m坡长比1.5 m坡长的坡面侵蚀量大5.4倍。但以上成果主要集中在坡耕地及缓坡地上,而对于具有特殊性质的地貌单元—工程堆积体来说只在近年来有较少成果出现,如:牛耀彬等人<sup>[9]</sup>通过标准径流小区的冲刷试验研究表明黄土工程堆积体的坡面产沙率随着产流时间呈现上下波动的变化趋势,且坡长增大,波动频率变少,振幅变大;坡面径流含沙量随着坡长的增大而增大;形成细沟的宽深比随着坡长的增大而增大。邓利强等人<sup>[10]</sup>通过室内模拟降雨研究认为在坡度为 $25^\circ$ 不同坡长的工程堆积体坡面上径流率随放水时间呈先增大后平稳波动趋势,且不同坡长下径流率和土壤剥蚀率的波动程度不同,坡长越长,细沟数量越多,波动程度越大。张乐涛等人<sup>[11]</sup>通过野外放水试验研究 $36^\circ$ 的工程堆积体边坡发现不同坡段的堆积体边坡水流的平均流速随坡长增加呈S形曲线变化,平均阻力系数与坡长呈双曲线函数关系。已有成果<sup>[12]</sup>表明,工程堆积体因其本身的特殊质地和地貌特征在侵蚀规律方面和缓坡地有着很大差别,而关于坡耕地、缓坡地的成果不能代表较陡工程堆积体的侵蚀规律,进而影响了工程堆积体水土流失的防治效果。坡长作为RUSLE模型中一个重要的影响因子,不但是决定坡面能量沿程变化,影响坡面产流产沙过程的重要地貌因素之一,而且决定着相应水土流失防控措施的配置。因此,本文通过野外模拟径流冲刷试验,旨在揭示工程堆积体径流侵

蚀过程中,坡面长度与工程堆积体产流产沙的关系,为生产实践中工程堆积体水土流失合理防控提供重要的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2016年7—9月在中国科学院水利部水土保持研究所杨凌水土保持野外科学试验站( $107^\circ59'36.12''E, 34^\circ19'24.84''N$ ),所在地北接黄土高原,南临渭水,地势北高南低,海拔在431~559 m之间,属于暖温带大陆季风型半湿润气候,多年平均气温约 $13^\circ C$ ,多年平均降雨量610 mm且季节分布不均匀,多集中在7—9月份,多年平均蒸发量1500 mm。地带性土壤类型为褐土,土壤母质为中壤质马兰黄土<sup>[13-14]</sup>。

试验小区为标准径流小区(坡面投影长20 m,宽5 m),覆土厚度0.5 m。试验小区修建在工程开挖坡面上,覆土为工程弃土,均匀填充在试验小区上,堆置前清除杂草及植物根系,坡面无植被覆盖,土石比超过9:1,粒径多在1 mm以下。试验用土砂砾、粉粒、黏粒的含量分别为4.19%,71.95%和23.86%。

### 1.2 实验方法

相关学者<sup>[15-16]</sup>通过野外调查发现工程堆积体的坡度大多在 $30^\circ$ 左右,陕西省关中平原区弃渣场的坡度可达到 $35^\circ$ ,因此本实验设计坡度为 $24^\circ, 28^\circ, 32^\circ$ 。设计坡宽为1 m。设计坡长分别为4, 8, 12, 16, 20 m。根据当地气象数据和可能产生的最大径流量,设计雨强定为1.5 mm/min,不同坡长对应的放水流量分别为6, 12, 18, 24, 30 L/min(径流系数为0.5条件下汇水面积为2倍试验小区面积时的上方来水)。试验时长为开始放水到产流开始后30 min,每场试验重复2次。开始试验前,为保证每次试验的下垫面条件基本一致,需将坡面整平,压实,并在试验前24 h对坡面土壤均匀撒水,直至坡面即将产流,用塑料薄膜覆盖备用。为准确控制冲刷流量,试验前多次进行体积法率定,允许误差范围 $\pm 5\%$ 。试验时采用恒压供水以确保溢流槽出流稳定,待小区出流槽产流后记录产流时间,之后重新开始计时。开始产流后的前3 min每隔1 min用1000 ml泥样瓶接1次径流泥沙样,3 min以后每隔3 min接1次径流泥沙样,记录接样时间,将泥样瓶收集带回实验室称重,烘干处理后计算各时段产流率、产沙率、累积产流量、累积产流量。

实验数据使用Excel和SPSS 19.0进行分析及作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡长对产流过程的影响

2.1.1 产流率随产流时间的动态变化 产流率指单位时间内产生的径流量。由各时段的产流时间与产流率关系图可以看出(图 1),本试验条件下,产流初期产流率随产流时间呈现缓慢增加趋势,而后从某一时刻开始,随产流时间产流率波动且没有明显的增大。 $24^{\circ}$ 、 $28^{\circ}$ 、 $32^{\circ}$ 坡面的产流率均随坡长的增加呈现持续波动。 $32^{\circ}$ 、 $28^{\circ}$ 、 $24^{\circ}$ 坡面产流率出现波动分别出现在产流后 6,9,12 min。产流初期产流率缓慢增加可能是因为产流之前坡面入渗性能良好,当产流开始后坡面入渗逐渐减小,根据水量平衡原理,此阶段的坡面径流量逐渐增大,则产流率呈增加趋势,直到入渗稳定,坡面径流在某个范围内稳定波动。

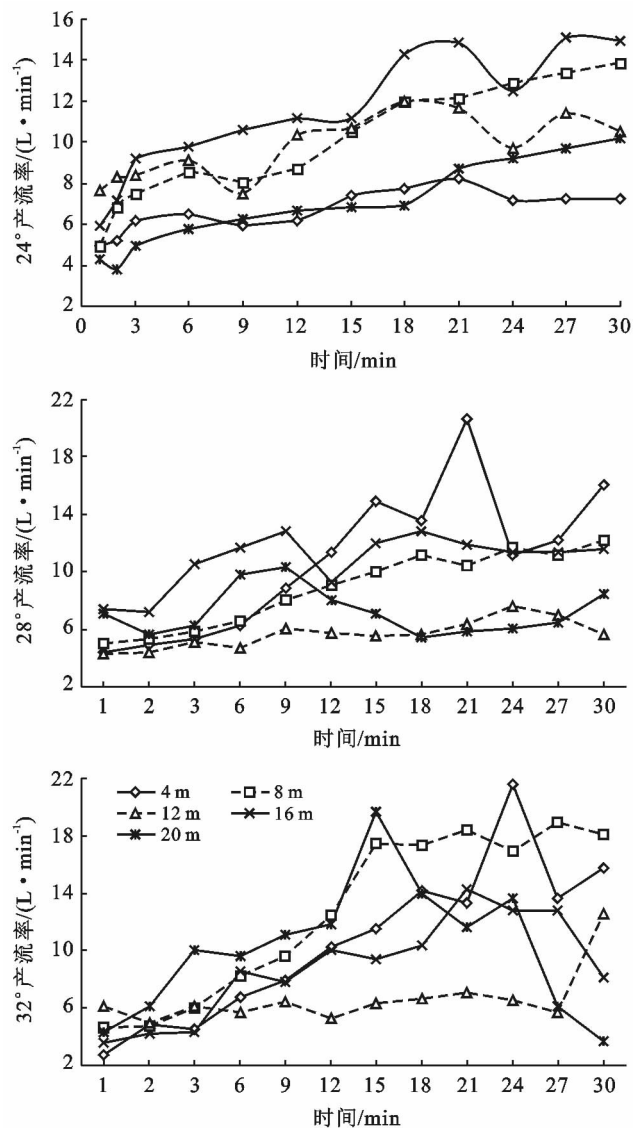


图 1 3 种坡度条件下不同坡长的产流过程

随着产流时间的持续,坡面开始产生小跌坎并在水流冲刷作用下不断发生溯源侵蚀,使得跌坎逐渐贯通为细沟,产流后期,坡面细沟开始发生垂直于水流方向的侵蚀,细沟沟壁失稳、坍塌,水流与坡面土壤产生新的接触面,水分入渗短时间内增大,坡面径流量又一次减小,产流率减小,直到入渗再一次趋于稳定,产流率再次增大。如果沟壁发生坍塌的时间大于土壤入渗趋于稳定的时间,产流率也会增加。相同坡长不同坡度的坡面水流对坡面的垂直侵蚀力不同,导致细沟沟壁发生坍塌的时间也不同, $32^{\circ}$ 坡面较  $28^{\circ}$  和  $24^{\circ}$  坍塌的更早,影响了产流率开始持续波动的时间。而自然黄土坡面的产流率大多随冲刷时间的增加不断增大,且坡长越长产流率的增幅越大。这可能是由于自然黄土坡面较工程堆积体的土质密实且具有良好的团粒结构,因此水流的面蚀时间较工程堆积体更长,水流入渗达到稳定的时间也更快,并且根据实际调查发现工程堆积体大多产生平行的独立细沟,而自然黄土坡面的沟网复杂,且坡长越长沟网越发达,水流流路更广,产流增幅自然更大<sup>[17]</sup>。

2.1.2 坡长对累积产流量的影响 累积产流量用来反映在相同放水条件下,不同坡长和坡度的坡面产生的总径流量的大小。由不同坡度条件下累积产流量随坡长变化的曲线(图 2)可以看出,累积产流量随坡长的增加呈现波动增加趋势,且累积产流量与坡长之间具有幂函数关系,受坡度的影响不明显。这是因为坡长越长,面积越大,累积径流量自然就越大。但累积产流量与坡长之间的这种关系与放水流量的大小有关,不同放水流量下两者间的具体关系存在差异,还有待相关学者进一步研究。

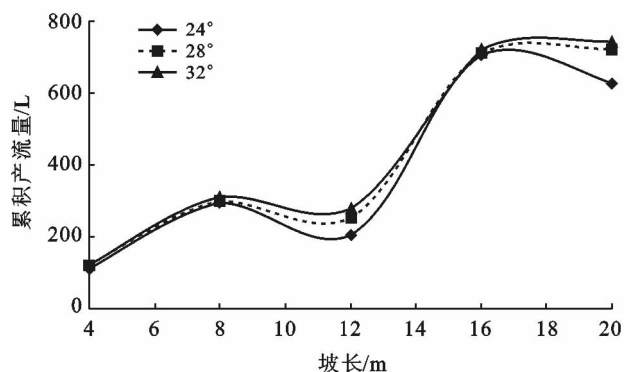


图 2 不同坡度下坡长与累积产流量的关系

### 2.2 坡长对产沙过程的影响

2.2.1 产沙率随产流时间的动态变化 产沙率是单位时间内产生的泥沙质量。由图 3 可知,产沙率随放水时间呈持续波动趋势,且放水后期的波动大于放水

前期,波动幅度表现为: $32^{\circ} > 28^{\circ} > 24^{\circ}$ 。产沙率随坡长持续波动。由于放水初期水流主要携带的是土体表面的松散碎屑物质,侵蚀方式为面蚀,产沙率增加较平稳,当土体表面的松散颗粒被全部冲走后,水流开始冲刷相对密实的土体,侵蚀方式从面蚀转为沟蚀。随着坡面细沟的形成,为泥沙的输移提供了通道,径流侵蚀搬运泥沙增大,伴随着细沟沟壁失稳、坍塌和沟岸扩张,侵蚀泥沙出现周期性增大和减小,在产流后期,细沟形态基本稳定,侵蚀泥沙趋于减小,从而导致产沙率整体呈现波动变化。坡度影响沟壁发生失稳坍塌的时间,坡度越大,水流受重力作用产生的侵蚀力越强,因此波动幅度越大。

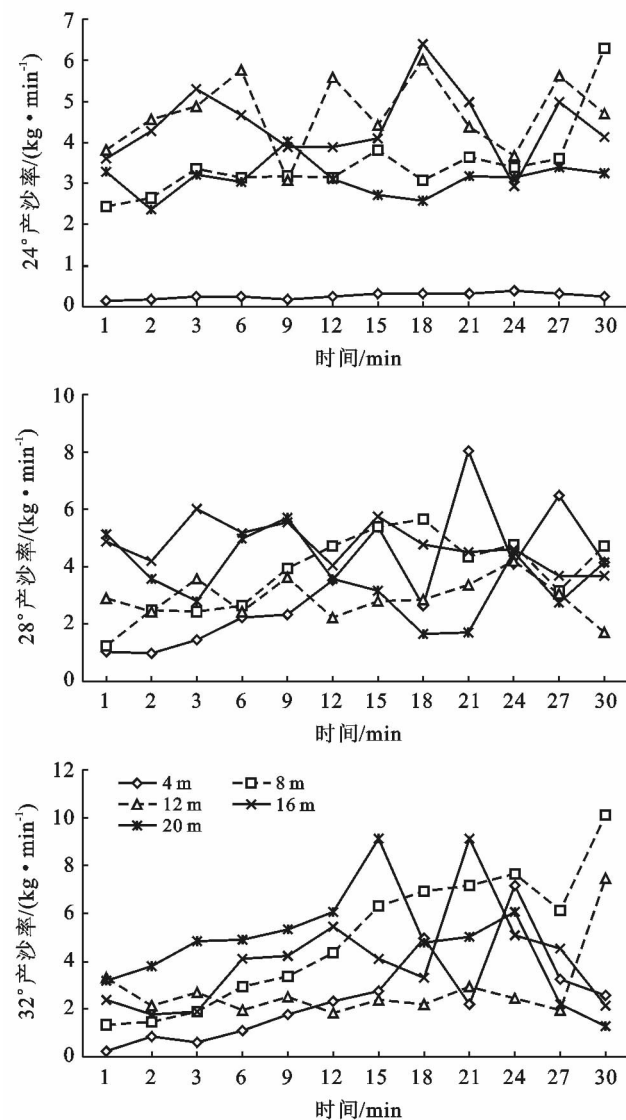


图3 3种坡度条件下不同坡长的产沙过程

当坡度为 $24^{\circ}$ ,坡长为4 m时,产沙率始终接近零。原因可能是该条件下水流动能与水流所受的重力势能相互消长,因此没有多余的能量用于搬运泥

沙。自然黄土坡面的产沙率随冲刷历时的增加先增加后减小,且大坡长坡面的产沙率变化幅度小于小坡长坡面。原因可能是工程堆积体土质普遍比较疏松,可被冲刷的松散颗粒比较多;且工程堆积体往往缺少植被覆盖,缺少植物根系对土壤的固定作用<sup>[18]</sup>,因此侵蚀更容易发生。

2.2.2 坡长对累积产沙量的影响 累积产沙量是用来反映在相同放水条件下,不同坡长坡度的坡面产生径流时水流中总泥沙量的大小。由图4可以看出,累积产沙量随坡长的增加总体呈增加趋势,且坡度越大,增加速率越大。从图4中可以看出,当坡长小于8 m时,大坡度坡面的累积产沙量变化速率与小坡度相差不大,当坡长超过8 m时,累积产沙量开始随坡度发生变化,当坡长大于16 m左右时,累积产沙量关系为: $32^{\circ} > 28^{\circ} > 24^{\circ}$ 。表明当坡长大于16 m时,水流中泥沙的总动能远大于泥沙所受的总重力势能。此条件下的坡长和坡度与累积产沙量具有正效应。

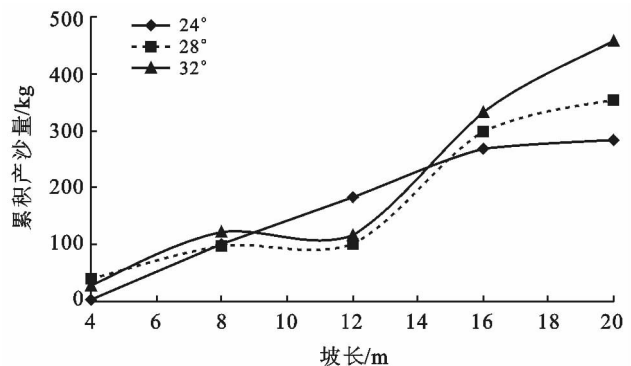


图4 不同坡度下坡长与累积产沙量的关系

### 2.3 坡长对产流和产沙关系的影响

通过分析 $24^{\circ}$ , $28^{\circ}$ , $32^{\circ}$ 这3个坡度下4,8,12,16,20 m坡长处,的坡面在整个放水过程中产流率和产沙率的相关性得出表1。从表1可以看出,4 m和8 m坡长的产流率和产沙率都在置信度为0.01的相关性水平上显著相关,即产流率和产沙率极强相关。坡长为12,16,20 m时,只有在坡度为 $32^{\circ}$ 的坡面上,产流率和产沙率在置信度为0.01的相关性水平上显著相关,当坡度为 $28^{\circ}$ 和 $24^{\circ}$ 时产流率和产沙率表现为弱相关或不相关。当坡长较小时,坡面细沟分支少,水流流路较稳定,径流携带的泥沙量随产流时间的增加波动性小,而当坡长较大时,坡面细沟分支多,水流走向较不稳定,径流量和产沙量的变化波动性更强。坡度影响着水流的入渗和重力势能,短陡坡较长缓坡的产流率和产沙率间的相关性更强。因此,在大坡度坡面上控制水土流失应进行合理的削坡分级,使坡长处于4~8 m范围内,此时坡面的产流产沙量可控性更强。

表 1 不同坡长下产流率与产沙率的相关性分析

坡长	坡度	相关系数
4 m	32°	0.930**
	28°	0.902**
	24°	0.771**
8 m	32°	0.832**
	28°	0.720**
	24°	0.746**
12 m	32°	0.694*
	28°	0.469
	24°	0.483
16 m	32°	0.790**
	28°	0.329
	24°	0.252
20 m	32°	0.832**
	28°	0.676*
	24°	0.387

注:试验样本数  $n=12$ ; \* 表示在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的; \*\* 表示在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的。

## 2.4 累积产流量与累积产沙量间的关系

分别拟合 32°, 28°, 24° 坡面累积产流量与累积产沙量随坡长变化的关系(表 2)。由表 2 可知,累积产流量与累积产沙量具有良好的线性函数关系。从方程中可以看出累积产沙量随着累积产流量的增大而增大,坡度越大,累积产沙量随累积产流量的增加幅度越大,且线性关系越强。

表 2 累积产流量(x)与累积产沙量(y)的关系

坡度	拟合方程	决定系数 $R^2$
32°	$y=0.62x-57.07$	0.95
28°	$y=0.50x-29.81$	0.98
24°	$y=0.39x+16.16$	0.77

## 3 结论

(1) 黄土区工程堆集体产流率随产流时间呈现先缓慢增加后持续波动趋势,且出现持续波动的时间表现为:32°<28°<24°。24°, 28° 和 32° 坡面的产流率随坡长的增加持续波动。

(2) 黄土区工程堆集体产沙率随产流时间呈持续波动趋势,产流后期波动大于产流前期,波动幅度表现为:32°>28°>24°。24°, 28° 和 32° 坡面的产沙率随坡长的增加持续波动。

(3) 黄土区工程堆集体 4 和 8 m 坡长的坡面产流率和产沙率之间相关性显著,12, 16, 20 m 坡长的坡面只有在 32° 时相关性显著,24° 和 28° 时产流率和产沙率相关性不显著。产流率和产沙率间的相关性表现为:短陡坡>长缓坡。

(4) 黄土区工程堆集体累积产流量和累积产沙量随坡长的增加总体呈增加趋势,且符合幂函数关系。在不同坡长及坡度的坡面上,累积产沙量和累积产流量之间具有良好的线性函数关系。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 蔺明华. 开发建设项目新增水土流失研究[M]. 河南郑州:黄河水利出版社, 2008.
- [2] 宋晓强, 张长印, 刘洁. 开发建设项目水土流失成因和特点分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5):108-113.
- [3] 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):20-21, 48.
- [4] 孙厚才, 赵永军. 我国开发建设项目水土保持现状及发展趋势[J]. 中国水土保持, 2007(1):50-52.
- [5] 蔡强国. 坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响[J]. 云南地理环境研究, 1998(1):34-43.
- [6] 郭新亚, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):40-44.
- [7] Kinnell P I A. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3):1004-1008.
- [8] Agassi M, Benhur M. Effect of slope length, aspect and phosphogypsum on runoff and erosion from steep slopes. [J]. Soil Research, 1991, 29(2):197-207.
- [9] 牛耀彬. 黄土工程堆集体坡面细沟发育过程与侵蚀产沙[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [10] 邓利强. 黄土区工程堆集体水蚀特征及测算模型坡长因子试验研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [11] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆集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.
- [12] 程冬兵. 上方来水条件下工程开挖面土壤侵蚀模型研究[C]//中国水土保持学会, 台湾中华水土保持学会, 2015 年海峡两岸水土保持学术研讨会论文集(上), 2015.
- [13] 朱显谟, 贾文锦, 张相麟, 等. 暂拟陕西土壤分类系统[J]. 土壤通报, 1959(1):23-27.
- [14] 朱显谟. 黄土土壤能成为一个独立土纲吗? [J]. 土壤通报, 1993(1):40-42.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王玲玲, 范东明, 王文龙, 等. 水蚀风蚀交错区不同坡长坡面产流产沙过程[J]. 人民黄河, 2016, 38(3):72-75, 79.
- [18] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(1):48-56.