

DOI: 10.11766/trxb201804280005

# 岩溶区煤矿工程堆积体边坡细沟发育及其水沙关系研究\*

林 姿<sup>1</sup> 史东梅<sup>1†</sup> 娄义宝<sup>1</sup> 蒋光毅<sup>2</sup> 彭旭东<sup>3</sup> 李叶鑫<sup>4</sup>

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

(2 重庆市水土保持生态环境监测总站, 重庆 401147)

(3 贵州大学林学院, 贵阳 550025)

(4 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘 要** 重力作用对坡面径流泥沙和细沟发育具有重要影响。以煤矿工程堆积体为研究对象, 采用野外实地放水冲刷法研究不同坡度条件下, 重力作用对工程堆积体边坡产流产沙细沟发育形态的影响。结果表明: (1) 工程堆积体坡面侵蚀过程分为面蚀(产流3 min内)和细沟侵蚀阶段, 其中细沟侵蚀存在扩张(产流3~24 min)、过渡(产流24~30 min)和稳定(产流30 min后)3个发展过程, 细沟最快出现为4s、最慢为97 s, 二者出现时间约相差24倍。(2) 重力作用是影响工程堆积体边坡产流产沙及其波动性变化的重要原因, 对工程堆积体边坡总产沙量贡献在17.41%以上, 最高可达99.60%; 初步判定, 重力作用对边坡细沟发育影响作用明显的临界径流条件为20 L·min<sup>-1</sup>, 临界坡度条件为35°。(3) 重力作用造成工程堆积体边坡细沟由短向长、由浅向深、由窄向宽发展, 坡面细沟沟宽在7.89~19.73 cm之间, 沟深在2.17~6.73 cm之间, 宽深比在2.12~4.36之间, 细沟密度在1.35~3.00 m·m<sup>-2</sup>之间; 径流作用主导细沟深度发育, 而重力作用主导细沟宽度发育; 边坡细沟密度随放水流量及坡度增加呈先增大后减小的趋势。研究结果对于正确认识煤矿工程堆积体边坡产流产沙特征、影响因素及土壤侵蚀量测算具有重要参考意义。

**关键词** 细沟发育; 重力作用; 水沙关系; 工程堆积体; 煤矿工程

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

工矿区水土流失是由于人为扰动地面或堆置固体废弃物而造成水资源和土地资源的破坏和损失<sup>[1]</sup>。作为我国主要能源之一的煤矿工程在建设

和生产运行期间的各种活动会大量占压土地资源并产生各种废弃堆积物, 对周边水资源、土地资源、植被资源、水文循环和生态环境质量造成严重影响甚至破坏。煤矿工程建设所产生的大量弃土、石、渣, 在水力和重力作用下极易发生诱发性崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害<sup>[2]</sup>。一旦坡面水流将地面切割出一定高差后, 沟道两侧的物质势能得到释放机会, 形成水力与重力相伴发生的复合侵蚀<sup>[3]</sup>。当坡面侵蚀形式由面状侵蚀发展为细沟侵蚀

\* 重庆市水利局科技项目“重庆市生产建设项目水土流失危害评价研究(ZXKJXM 002825)”和“重庆市水力侵蚀监测点背景侵蚀环境调查(20170036)”资助 Supported by the “Study on the Damage of Soil and Water Loss in the Production and Construction Projects in Chongqing City (No. ZXKJXM 002825)” and “Investigation on Background Erosion Environment of Hydraulic Erosion Monitoring Points in Chongqing (No. 20170036)” of Science and Technology Project of Chongqing Municipal Water Conservancy Bureau

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shidm\_1970@126.com

作者简介: 林 姿(1994—), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: linzi1994zj@126.com

收稿日期: 2018-04-28; 收到修改稿日期: 2018-12-01; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-01-03

时, 侵蚀量会成倍或数十倍增长<sup>[4-5]</sup>, 可达到坡面总侵蚀量70%以上<sup>[6]</sup>。目前对工程堆积体坡面土壤侵蚀过程研究集中在工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程<sup>[7]</sup>、边坡面蚀<sup>[8]</sup>、弃土场侵蚀产沙过程<sup>[9]</sup>、边坡土壤流失量的预测<sup>[10-11]</sup>、煤矿工程建设松散弃渣诱发人为泥石流发育特征<sup>[12-13]</sup>及工程堆积体水土流失防治等<sup>[14-15]</sup>, 较少涉及重力作用对坡面细沟形态特征的影响。坡面上跌水的形成是侵蚀方式变化的重要分界点, 标志着细沟开始形成<sup>[16]</sup>, 重力作用对其形成和坡面产流产沙变化有直接影响。因此本文以煤矿工程堆积体为研究对象, 采用野外实地放水冲刷法, 重点研究: (1) 工程堆积体坡面细沟侵蚀发生特征, 分析坡面土壤侵蚀发展阶段特征; (2) 重力作用对不同堆积体坡面水沙关系的影响大小及形成原因; (3) 重力作用对细沟发育过程的影响。研究结果对于正确认识煤矿工程堆积体坡面产流产沙特征、影响因素及土壤侵蚀量预测模型建立具有重要科学意义, 也有助于科学认识重力作用在工程堆积体人为诱发性崩塌、滑坡和边坡稳定性分析中的作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

工程堆积体来源于重庆市5大矿区之一的天府煤矿, 该矿区处于喀斯特岩溶区; 重庆市喀斯特岩溶区分布面积可达 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 在该地区分布有大量锰矿、煤矿、石灰石等建设项目。当地多年平均降雨量在1 000 mm以上, 工程堆积体在暴雨条件下极易发生诱发性崩塌、滑坡等严重土壤侵蚀现象。采样区成土母岩主要是石灰岩、泥灰岩, 土壤主要是暗紫色水稻土、暗紫泥土、矿子黄泥土、冷沙黄泥土等, 工程堆积体由土壤、不同径级的石灰岩及泥灰岩碎屑及块石所组成的岩土混合物, 这种物质组成在喀斯特矿区普遍存在。调查发现, 其边坡坡度多在 $25.5^\circ \sim 38^\circ$ 之间变化, 为客观反映不同堆放坡度条件下煤矿工程堆积体边坡的侵蚀特征, 本文设计了四种不同坡度 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 工程堆积体下垫面开展试验研究。将同一批煤矿工程堆积体均匀分层填入4个不同坡度( $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ )试验小区, 试验小区坡长10 m, 宽1 m。各小区的布置情况见表1。试验所用工程堆积体容重约为 $1.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,

总孔隙度为52.96%, 毛管孔隙度为13.45%, 非毛管孔隙为39.31%, 黏聚力为9.82 kPa, 内摩擦角为 $29.68^\circ$ 。每次放水冲刷试验前, 用铁耙将小区坡面平整, 同时小区内采集工程堆积体土壤样品, 测定其物理性质, 试验小区基本情况如表1所示。

### 1.2 野外放水冲刷试验设计

试验于2013年7—8月在西南大学生产建设项目水土流失定位试验基地进行(图1)。根据当地暴雨历时以及暴雨频率在试验小区上所产生的单宽流量特征, 为揭示流量对煤矿工程堆积体边坡细沟发育特征的影响, 本文放水流量采用10、15、20、25、30  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 五个梯度, 冲刷时间设计为60 min。

小区顶端放置1个簸箕型溢流槽, 以保证水流以薄层形式均匀向下流动。水流经稳压水泵及流量计后流入溢流槽, 并通过溢流槽上端阀门控制流量。试验前, 率定放水流量若干次, 保证放水流量与设计流量误差不超过5%。记录产流时间, 产流10 min内每1 min接取1次径流泥沙样, 10 min后每隔3 min接取1次泥沙样, 用烘干法( $105^\circ\text{C}$ )测定泥沙量。流速的测定是在坡面上、中、下断面中间位置, 采用染色法测定坡面表层最大流速并根据径流流态进行修正(过渡流修正系数为0.7, 紊流修正系数为0.8)。流宽、流深采用直尺测量, 分上、中、下三个断面测定。

## 2 结果

### 2.1 工程堆积体坡面细沟侵蚀发生特征

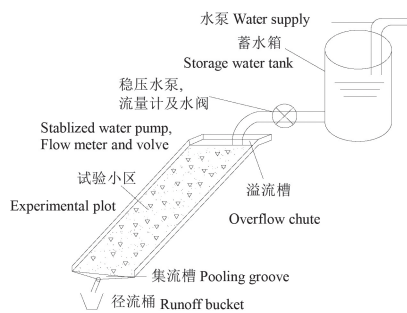
细沟是坡面侵蚀的一种类型, 细沟形成是坡面土壤侵蚀程度加剧的主要标志, 也是造成坡面产流产沙量变化的主要原因<sup>[17]</sup>; 由于径流汇集面积和流速不断增大, 坡面水流冲刷能力大大增加, 引起工程堆积体坡面不均匀凹陷, 从而在地表上逐渐形成细沟, 对工程堆积体细沟发育程度的影响因不同下垫面类型而有很大差异。由不同坡度条件下工程堆积体坡面侵蚀过程的几个关键时间可见(表2), 工程堆积体坡面产流时间随放水流量增大而缩短且坡度越大其产流时间越短, 细沟出现时间越短; 在各场冲刷试验中, 产流时间最迟(2 558 s)发生在 $25^\circ$ 坡面、 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 径流冲刷

表1 试验小区基本情况

Table 1 Basic information of the experimental plots						
小区编号 Plot	坡度 Slope /°	厚度 Thickness /m	物质组成 Material composition			容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )
			石砾 >2 mm Rock fragment content/%	砂粒 Sand content 2 ~ 0.075 mm /%	粉粒及黏粒 Silt and clay content <0.075 mm /%	
1	25	0.60	75.40	22.45	2.15	1.23
2	30	0.60	75.40	22.45	2.15	1.24
3	35	0.60	75.40	22.45	2.15	1.23
4	40	0.60	75.40	22.45	2.15	1.24

孔隙特征 Pore characteristics							
小区编号 Plot	坡度 Slope /°	厚度 Thickness /m	总孔隙度 Total porosity /%		入渗率 Infiltration rate /(mm·min <sup>-1</sup> )	黏聚力 Cohesive strength /(kPa)	内摩擦角 Internal friction angle /°
			总孔隙度 Total porosity /%	毛管 孔隙度 Capillary porosity /%			
1	25	0.60	53.24	13.93	1.26	7.30	28.90
2	30	0.60	51.64	13.25	1.33	11.65	30.79
3	35	0.60	53.46	13.45	1.60	14.64	29.13
4	40	0.60	52.96	13.05	1.31	9.69	29.88



a. 放水冲刷试验装置示意图

a. Layout of the field scouring experiment



b. 冲刷过程

b. Scouring process

图1 工程堆积体实验装置及冲刷过程示意图

Fig. 1 Schematic of the field scouring experiment apparatus and its scouring process on engineering waste piles

条件下，而产流时间最早（76s）发生在40°坡面、25 L·min<sup>-1</sup>径流冲刷条件下，这种现象主要与前期土壤含水率大小有关。各种工程堆积体坡面细沟出现时间也与放水流量、坡度呈负相关关系，即放水流量越大、坡度越大，细沟出现时间越短；细沟最快出现为4s、最慢为97s，二者时间相差24倍，这主要因为冲刷径流量越大、则坡面泥沙流失越快，细沟出现时间越短。微地形（坡度）条件也是决定

坡面细沟下切快慢和发育程度的原因之一，坡度越大、则重力作用对边坡细沟发育影响越大、细沟下切越快，出现时间越短。

工程堆积体坡面细沟形成后，由于细沟壁土体崩塌、脱落、下滑的随机性，使得坡面径流含沙量相应增大且呈现波动性变化趋势（图2）。不同坡度条件下工程堆积体坡面含沙量波动变化随冲刷时间呈现变化幅度减小趋势，工程堆积体坡面侵蚀过

表2 不同工程堆积体坡面细沟侵蚀过程特征

**Table 2** Characteristics of rill erosion process on slopes of the piles different in slope gradient

坡度 Slope /°	设计放水流量 Designed flow discharge /(L·min <sup>-1</sup> )	实际放水流量 Actual flow discharge /(L·min <sup>-1</sup> )	冲刷前土壤含水率 Antecedent soil moisture /%	产流时间 The time producing runoff /s	细沟出现时间 The time of rill occurred /s
25	10	10.0	20.00	2558	97
	15	15.1	22.11	364	72
	20	20.5	20.08	87	57
	25	25.3	12.52	136	35
	30	30.1	17.29	100	17
30	10	10.4	10.38	1218	82
	15	15.4	18.99	280	49
	20	20.0	16.79	115	31
	25	25.1	11.98	116	23
	30	30.4	17.30	116	12
35	10	10.5	18.40	914	44
	15	15.1	18.31	94	25
	20	20.5	19.90	87	17
	25	25.0	14.91	93	14
	30	30.0	19.41	95	8
40	10	10.0	10.17	805	15
	15	15.0	15.89	82	10
	20	20.1	22.68	88	7
	25	25.5	22.64	76	5
	30	30.0	18.30	96	4

注：产流时间指径流刚刚流出坡面的时间；细沟出现时间是指坡面出现明显细沟的时间。Note: Runoff initiation time is the time when runoff is observed for the first time on the slope; and rill appearing time is the time when rills appear for the first time on the slope

程可分为片蚀和细沟侵蚀2个阶段。

(1) 砂砾化面蚀阶段，即坡面开始产流至细沟形成时的坡面侵蚀过程。该阶段发生在产流后3 min以内，此时坡面表面形态被径流侵蚀破坏程度小，未形成跌坎和细沟<sup>[18]</sup>，随着径流侵蚀力增大达到足以剥离和分散坡面土壤时便发生侵蚀，这对坡面后续跌坎及细沟形成产生直接影响。

(2) 细沟状面蚀阶段，即坡面跌坎形成细沟后的坡面侵蚀过程，可概括为细沟扩张、过渡和稳定3个发展阶段。细沟扩张阶段主要发生在产流3~24 min之间，该阶段坡面流沿坡面低凹处汇集，造成堆积体坡面集中冲刷现象并开始形成细沟；同时由于在坡面细沟发育早期阶段，细沟沟头

崩塌、沟壁崩塌等重力作用过程严重，造成坡面含沙量剧烈波动变化现象，表现出明显的水力—重力复合侵蚀特点。过渡阶段主要发生在产流24~30 min之间，此时径流冲刷形成的水力侵蚀作用减弱，坡面细沟长宽深基本保持稳定，细沟沟壁重力作用现象减弱，这造成径流含沙量逐渐降低。稳定阶段则发生在产流30 min后，细沟沟壁重力作用成为该阶段泥沙的主要来源，坡面径流含沙量较小。

## 2.2 重力作用对堆积体坡面水沙关系的影响

重力作用是影响工程堆积体坡面产流产沙的重要因素。坡面细沟壁土体崩塌、滑落是造成工程堆积体坡面产流产沙过程中存在波动现象的重要原因，也是坡面不稳定的重要因素<sup>[19]</sup>。分析坡面产

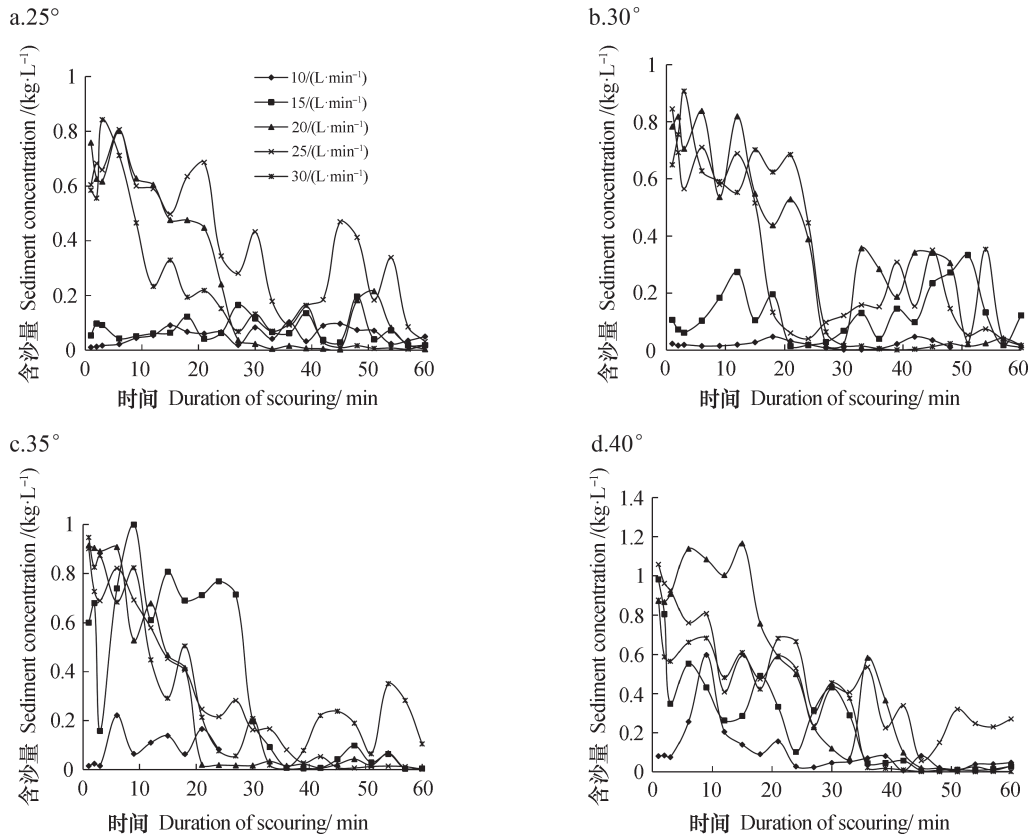


图2 不同工程堆积体坡面含沙量变化特征

Fig.2 Variation of sediment yield on the slope of the pile relative to feature of the pile

流产沙变异系数及重力作用对总产沙量贡献的关系 (表3)可知,平均产流率与放水流量呈正相关关系 ( $R^2 = 0.94$ ),而与坡度关系不明显;坡面产流率变异系数总体上随着放水流量增大而增加,变异系数最大 (374.3%)为40°坡面、25 L·min<sup>-1</sup>径流条件,最小 (7.774%)为35°坡面、10 L·min<sup>-1</sup>径流条件,二者相差48倍以上;主要原因在于当径流条件增大时,坡面细沟冲刷强烈,造成细沟沟壁崩塌,崩塌体在短时间内会堵塞水流;而当径流汇集达到一定程度后,细沟内崩塌体被迅速冲开,这使得坡面径流量在短时间内发生剧烈的波动变化。工程堆积体坡面径流含沙量总体上随放水流量增大而增加,在各次冲刷条件下径流含沙量最大为0.480 kg·L<sup>-1</sup>,最小为0.020 kg·L<sup>-1</sup>,二者相差24倍,这种现象主要是坡面水力侵蚀和细沟重力作用共同造成的。

工程堆积体坡面径流含沙量变异系数在一定程度上可反映重力对细沟作用的程度,变异系数越小则说明在坡面侵蚀过程中径流含沙量比较稳定,重力对细沟作用较少或没有发生;反之,重力对

细沟作用严重。由图3可知,在不同坡度坡面条件下,径流含沙量变异系数均随着放水流量增大呈现先增加、后减小的变化趋势,且20 L·min<sup>-1</sup>放水条件下径流含沙量变异系数将达到最大值,这表明重力作用明显影响堆积体坡面细沟发育的临界径流条件为20 L·min<sup>-1</sup>。当放水流量由10 L·min<sup>-1</sup>增加至20 L·min<sup>-1</sup>时,重力作用对坡面细沟程度逐渐增加并达到最大值,此时坡面径流含沙量以重力作用产沙为主、水力侵蚀产沙为辅;当放水流量由20 L·min<sup>-1</sup>增加至30 L·min<sup>-1</sup>时,重力作用对坡面细沟程度减弱,此时坡面含沙量以水力侵蚀和重力对细沟沟壁综合作用为主。在不同放水流量作用下,径流含沙量变异系数随坡度增加也表现出先增加、后减小的变化特点,且均在35°坡度条件下,径流含沙量变异系数达到最大值,这表明重力作用明显影响堆积体坡面细沟发育的临界坡度条件为35°。因此,生产建设项目区工程堆积体水土保持措施布置时应关注工程堆积体边坡的坡度大小,避免在暴雨诱发条件下人为崩塌、滑坡、泥石流的发生。

表3 坡面产流产沙变异系数及重力作用对总产沙量的贡献

**Table 3** Variation coefficient of runoff and sediment yields and contribution of gravity to the total sediment yield on the slopes of the piles

坡度 slope /°	放水 流量 Flow rate /(L·min <sup>-1</sup> )	产流率 Runoff yield rate		含沙量 Sediment concentration		产沙率 Sediment yield rate		重力作用 产沙贡献 Contribution of gravity /%
		平均产流率 Mean runoff yield rate /(L·min <sup>-1</sup> )	变异系数 Variation coefficient /%	平均含沙量 Mean sediment concentration /(kg·L <sup>-1</sup> )	变异系数 Variation coefficient /%	平均产沙 率 Mean sediment yield rate /(kg·min <sup>-1</sup> )	变异系数 Variation coefficient /%	
25	10.0	1.49	21.31	0.05	1.60	0.09	4.34	34.38
	15.1	2.77	13.74	0.08	2.93	0.21	10.35	53.45
	20.5	9.36	73.28	0.29	29.31	3.15	448.90	81.45
	25.3	11.45	76.17	0.41	13.20	5.18	305.30	64.80
	30.1	13.21	122.47	0.22	28.17	3.82	817.20	95.92
30	10.4	0.87	14.51	0.02	0.88	0.02	1.75	17.41
	15.4	2.49	20.40	0.12	6.53	0.35	26.10	24.24
	20.0	7.66	50.36	0.38	22.02	3.32	305.10	93.40
	25.1	9.81	54.24	0.30	24.84	3.37	430.80	84.88
	30.4	17.17	202.63	0.32	33.35	7.10	1021.02	81.18
35	10.5	0.36	7.77	0.09	5.27	0.04	2.87	20.84
	15.1	3.57	55.57	0.37	34.36	1.45	215.40	94.81
	20.5	5.90	127.51	0.27	48.12	2.49	612.70	93.50
	25.0	8.96	109.02	0.30	31.45	3.47	613.60	96.90
	30.0	12.67	221.24	0.34	26.92	5.23	871.30	53.64
40	10.0	0.22	9.19	0.10	15.99	0.04	19.44	80.90
	15.0	2.48	47.01	0.27	27.88	0.90	199.00	94.90
	20.1	6.69	22.07	0.48	39.26	3.31	311.70	95.80
	25.5	13.01	374.25	0.48	15.99	7.33	966.80	48.52
	30.0	13.30	81.17	0.34	27.63	5.15	487.80	99.60

注：重力作用产沙贡献指坡面细沟重力侵蚀产沙量与坡面出口总产沙量的比值<sup>[20]</sup> Note: Contribution of gravity refers to ratio of the sediment yield on rill banks due to gravity to the total sediment yield of the soil erosion on the slope<sup>[20]</sup>

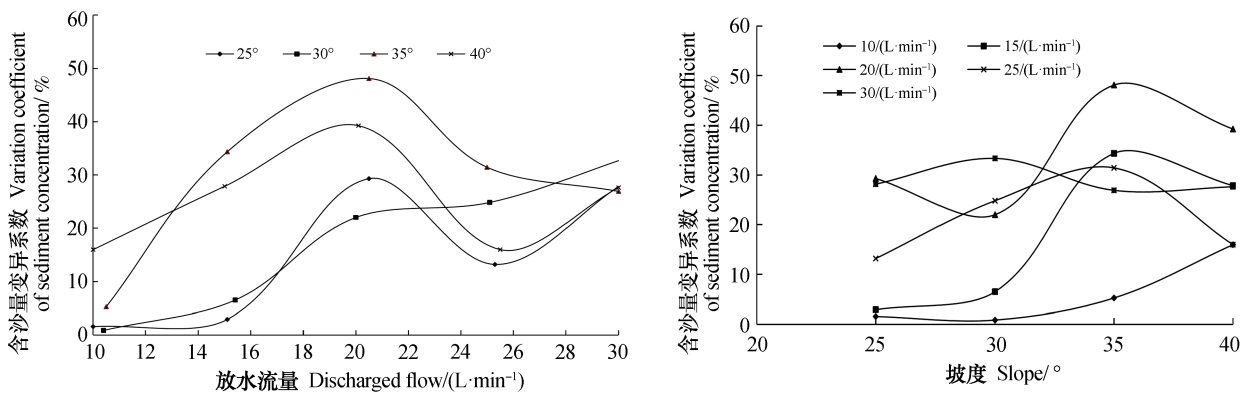


图3 径流含沙量变异系数与放水流量和坡度的关系

Fig. 3 Relationship of variation coefficient of the sediment concentration in runoff with discharged flow rate and slope gradient

在工程堆积体坡面细沟长、宽、深发育过程中,重力作用对细沟侵蚀发生具有很大的偶然性,很难及时观测和定量测定由水力作用单纯主导的临界侵蚀产沙量。因此本文采用细沟发育稳定的径流含沙量<sup>[21]</sup>(即每次冲刷试验中最后10 min的平均径流含沙量)作为水力侵蚀含沙量上限值和重力作用对细沟侵蚀含沙量的下限值。由表3可见,在各次冲刷试验中重力作用对坡面产沙量贡献最大为99.60%,最小为17.41%,这表明重力作用对工程堆积体坡面侵蚀是影响坡面产沙的重要因素,同时也是导致坡面径流含沙量波动变化的重要原因。

### 2.3 重力作用对堆积体坡面细沟形态发育的影响

相关研究表明,重力作用是造成坡面细沟由浅变深、由窄变宽的主要原因之一<sup>[19,22]</sup>,此处采

用重力作用产沙贡献表明重力作用对细沟形成发育的影响。由表4可知,在不同放水流量、坡度条件下,工程堆积体坡面细沟发育过程和特征差异明显。坡面细沟平均沟宽、沟深均随放水流量增大而增加,且坡度越大则细沟宽度、深度越大;这是由于在坡面细沟发育过程中,水流侵蚀会加剧沟底下切,使细沟变深,同时重力对细沟沟壁的作用会加速沟岸扩张,使细沟变宽。在各次冲刷试验中,细沟沟宽最小7.89 cm,最大19.73 cm;细沟沟深最大6.73 cm,最小2.17 cm,细沟的沟深、沟宽极值均相差3倍左右,这说明在堆积体坡面侵蚀过程中,径流作用对沟深发展起主导作用,重力作用对沟宽发展起主导作用且两种作用程度相当,所造成的侵蚀产沙量均为坡面径流泥沙的主要来源。

表4 不同工程堆积体坡面细沟发育特征

Table 4 Characteristics of rill development in the engineering accumulation slopes

坡度 Slope /°	放水流量 Discharged flow /(L·min <sup>-1</sup> )	侵蚀沟条数 Number of rills	平均沟宽 Average rill width /cm	平均沟深 Average rill depth /cm	最大沟宽 Maximal rill width /cm	最大沟深 Maximal rill depth /cm	最大沟长 Maximal rill length /cm	细沟平均密度 Average rill density /(m·m <sup>-2</sup> )	细沟宽深比 Rill width- depth
25	10.0	3	10.11	2.17	37	4	10	1.35	4.36
	15.1	6	11.72	3.83	20	7	10	1.77	3.06
	20.5	4	10.08	3.46	20	6	10	2.07	2.92
	25.3	5	19.73	4.67	32	12	10	2.88	4.23
	30.1	5	12.60	4.53	20	8	10	1.84	2.78
30	10.4	4	10.12	3.69	20	6	10	1.68	2.82
	15.4	6	11.72	4.04	26	6	10	2.42	2.90
	20.0	4	10.67	3.75	20	9	10	1.79	2.84
	25.1	6	12.72	4.94	20	10	10	2.52	2.57
	30.4	5	14.80	6.50	28	15	10	2.34	2.28
35	10.5	6	7.89	2.50	14	7	10	1.90	3.16
	15.1	4	16.58	4.13	29	7	10	1.74	4.02
	20.5	5	8.87	3.37	16	8	10	2.39	2.63
	25.0	5	13.13	4.53	21	12	10	2.75	2.90
	30.0	7	11.42	5.38	28	13	10	3.00	2.12
40	10.0	4	9.33	3.17	15	5	10	1.86	2.95
	15.0	5	8.73	3.60	20	13	10	1.59	2.43
	20.1	4	11.58	4.83	23	13	10	1.95	2.40
	25.5	5	17.33	6.73	30	16	10	1.93	2.57
	30.0	5	16.67	6.33	40	17	10	2.16	2.63

在相同径流条件下,坡面细沟密度越大则相应的侵蚀产沙量也越大;重力作用坡面产沙贡献随坡度和放水流量增加呈波动趋势变化。在坡面细沟发育过程中,由于冲刷初期细沟长、宽、深和细沟密度均较小(1.35~1.90 m·m<sup>-2</sup>),水流冲刷形成的产沙量(1.74~2.39 kg)高于细沟沟壁重力坍塌形成的产沙量(0.46~1.77 kg);在冲刷后期由于细沟长、宽、深的扩大和细沟密度变大(2.07~3.00 m·m<sup>-2</sup>),重力作用对细沟沟壁产沙量增加至149.00~162.7 kg,细沟沟壁崩塌泥沙可能堵塞水流,造成细沟水流流路发生改变使坡面细沟呈现S型发育。细沟沟壁崩塌主要与沟道下切、侧蚀以及由于土壤含水率增大所致,造成的土壤黏聚力降低及土壤膨胀现象有关。细沟宽深比反映了坡面细沟下切程度及细沟沟壁发生崩塌等重力作用可能性,工程堆积体坡面细沟宽深比最大为4.36,最小为2.12,二者相差2倍;细沟宽深比随放水流量和坡度增大而减小,说明坡度增大会加剧沟底下切、增大重力作用对细沟沟壁侵蚀发生可能性。

### 3 讨论

坡面侵蚀过程及坡度对工程堆积体边坡稳定性有重要影响。相关研究表明,坡面径流侵蚀对边坡破坏形式主要包括边坡浅部冲刷、淘蚀破坏及深部入渗溶蚀破坏3种形式<sup>[23-24]</sup>。在一次径流冲刷后,工程堆积体坡面变得更加粗糙,这使得径流流路更为集中,径流动力条件不均匀程度迅速增加;因此当降雨径流再次冲刷时,重力作用对坡面细沟侵蚀和沟壁崩塌等侵蚀更剧烈,造成了松散堆积坡面不稳定程度加剧。同时坡面入渗水流会促使边坡内部土体含水率不断增大,而入渗水的溶蚀作用会对土体内部可溶性盐类和胶结物质产生化学侵蚀,这在一定程度上也增加了边坡不稳定性。同时工程堆积体中块石会直接影响堆积体坡面侵蚀类型和形式,也会导致重力作用对坡面侵蚀和水力侵蚀贡献率差异性。坡度作为影响坡面侵蚀发生与否的地形因子,可直接决定坡面土体稳定状态。坡度越大则坡面土体所受到的下滑力越大,最大静摩擦力越小,同时坡度越大径流流速越大,侵蚀潜能增加<sup>[25-27]</sup>。在不同坡度条件下,侵蚀发生形式及

侵蚀量存在较大差别。根据本文研究,当放水流量为15、20、25 L·min<sup>-1</sup>时,35°坡面的径流含沙量变异系数最大、重力作用对坡面产沙贡献最大(图4),这表明小于35°的坡面以水力侵蚀产沙为主,而大于35°坡面以重力作用产沙为主;在最小(10 L·min<sup>-1</sup>)和最大放水流量(30 L·min<sup>-1</sup>)条件下,35°坡面径流含沙量变异系数较小、重力作用对坡面产沙贡献也较小,初步判定,该流量条件下径流侵蚀对坡面含沙量贡献最大的临界坡度为35°。王文龙等<sup>[28]</sup>对5°、15°、25°及35°条件下坡面侵蚀过程的研究也表明,坡沟系统在5°、15°和25°坡度条件下,坡面土壤侵蚀方式以溅蚀、片蚀和沟蚀为主,而大于或等于35°条件时,坡面土壤侵蚀方式以切沟为主,且有崩塌、滑塌等侵蚀发生。研究均表明在坡面细沟侵蚀过程中,细沟沟壁崩塌等侵蚀发生不仅取决于微地形条件,还决定于细沟被径流冲刷淘蚀的程度,因此今后应加强重力与降雨、径流、微地形(坡度和坡长)、坡面细沟发育形态之间的定量研究,不同土石比工程堆积体坡面径流连续冲刷过程及其边坡稳定性的模拟研究,为重力作用对坡面侵蚀过程模拟研究提供基础数据。

土壤抗剪强度是影响坡面侵蚀发生的重要原因之一,它决定了坡面土体内部力学稳定性。研究表明,坡面土体稳定性取决于土壤摩擦阻力和土壤内聚力<sup>[29]</sup>,而土壤含水率及密实度则是影响重力作用的主要因素<sup>[30]</sup>。根据本文研究,工程堆积体土壤黏聚力在16.18%含水率时可达最大14.64 kPa,随含水率增大呈先增加后减小变化趋势,而内摩擦角则随含水率增加而减小(图5)。重力作用明显影响堆积体坡面细沟发育的临界坡度条件为35°,其数值大于工程堆积体内摩擦角(30.79°)。相关研究也表明,土壤抗剪强度和水分含量呈反比关系<sup>[31]</sup>。当坡面土壤含水率增大时,不仅会增大土体沿坡向的重力分力,而且会减小土体黏聚力和内摩擦角,使土体或土层处于失稳状态。因此,根据上述坡面土体抗剪强度和含水率量化关系,在雨季及时采取边坡防护措施,以提高工程堆积体稳定性,防止暴雨诱发性崩塌、滑坡、泥石流灾害发生的可能性。植被在提高边坡土壤的抗侵蚀能力、增强土壤的稳定性中起着至关重要的作用,细根、中等直径的根系分泌物对土体颗粒起到黏结作用,



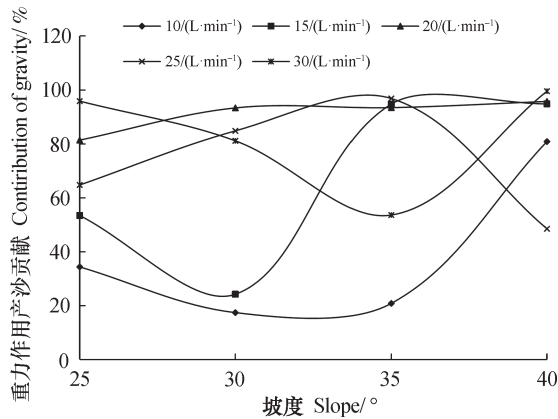


图4 重力作用产沙贡献与坡度的关系

Fig.4 Relationship between contribution of gravity and slope gradient

从而提高土壤的黏聚力 $c$ , 进而提高土壤的抗剪强度<sup>[32]</sup>, 今后应加强植物根系、土壤含水率、土壤紧实度与土体抗剪强度相互作用关系研究, 寻求减弱重力作用对坡面侵蚀有效途径。

## 4 结 论

工程堆积体坡面侵蚀过程可分为面蚀(产流 3 min 内)和细沟侵蚀阶段, 其中细沟侵蚀存在扩张(3~24 min)、过渡(24~30 min)和稳定(30 min 后)3 个发展过程。工程堆积体坡面细沟出现时间与放水流量、坡度呈负相关关系, 细沟出现时间最快为 4 s, 最慢为 97 s, 二者约相差 24 倍。重力作用是影响工程堆积体边坡产流产沙及波动变化的重要原因。在坡面侵蚀过程中产流率变异系数在 7.77%~374.3% 之间, 产沙率变异系数在 1.75%~1021% 之间; 重力作用对工程堆积体边坡总产沙量贡献在 17.41% 以上, 最高可达 99.60%; 初步判定, 重力作用明显影响堆积体边坡细沟发育的临界径流条件为  $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 临界坡度条件为  $35^\circ$ 。径流作用主导细沟深度发展, 而重力作用主导细沟宽度发展, 两种主导作用对工程堆积体边坡细沟发育影响程度相当。工程堆积体边坡细沟沟宽在 7.89~19.73 cm 之间, 沟深介于 2.17~6.73 cm, 宽深比介于 2.12~4.36, 细沟密度介于  $1.35\sim 3.00 \text{ m}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 边坡细沟平均沟宽、沟深均随放水流量增大而增加, 且坡度越大、细沟宽度、深度越大; 在相同径流条件下, 侵蚀产沙量随边坡细沟密度增大而增大。

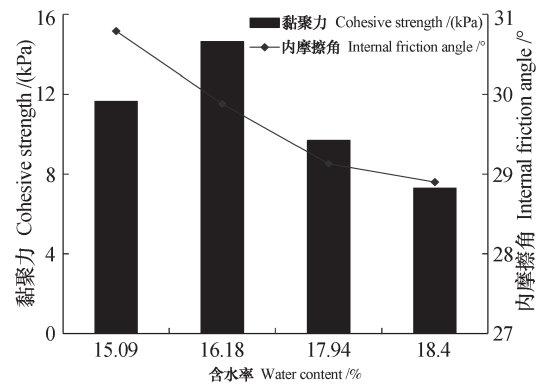


图5 土壤含水率与黏聚力和内摩擦角的关系

Fig.5 Relationships of soil water content with cohesive strength and internal friction angle

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 李文银, 王治国, 蔡继清. 工矿区水土保持. 北京: 科学出版社, 1996  
Li W Y, Wang Z G, Cai J Q. Soil and water conservation in industrial and mining areas (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996
- [ 2 ] 史东梅. 高速公路建设中侵蚀环境及水土流失特征的研究. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 5—9  
Shi D M. Study on eroded environment and its soil and water loss (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (2): 5—9
- [ 3 ] Gong J G, Jia Y W, Zhou Z H, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes. Geomorphology, 2011, 125 (1): 203—213
- [ 4 ] Dunkerley D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. Hydrological Processes, 2008, 22 (22): 4415—4435
- [ 5 ] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany—A meta-analysis. Geomorphology, 2009, 111 (3): 182—193
- [ 6 ] Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion. Catena, 2008, 75 (1): 38—44
- [ 7 ] 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. 农业工程学报, 2013, 29 (8): 145—153  
Zhang L T, Gao Z L, Li Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope

- under simulated runoff conditions (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (8): 145—153
- [ 8 ] 丁文斌, 李叶鑫, 史东梅, 等. 两种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研. 土壤学报, 2017, 54 (3): 558—569  
Ding W B, Li Y X, Shi D M, et al. Contrast study on simulated runoff erosion of two engineering accumulation slopes (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (3): 558—569
- [ 9 ] 孙虎, 甘枝茂. 城市化建设人为弃土引发的侵蚀产沙过程研究. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 1998, 26 (3): 95—98  
Sun H, Gan Z M. Erosion and sediment yielding process of soil dumped by people in urbanizing construction area (In Chinese). Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 1998, 26 (3): 95—98
- [ 10 ] 何元庆, 魏建兵, 郭彦娟, 等. 3D激光扫描测量开发建设项目堆弃土边坡侵蚀强度的试验研究. 中国水土保持, 2012 (11): 31—33  
He Y Q, Wei J B, Guo Y J, et al. Experimental study on erosion intensity monitoring of spoil slopes of development project by 3-D laser scanner (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2012 (11): 31—33
- [ 11 ] Pan X Z, Zhao Q G. Measurement of urbanization process and the paddy soil loss in Yixing City, China between 1949 and 2000. Catena, 2007, 69 (1): 65—73
- [ 12 ] 王文龙, 李占斌, 张平仓. 神府东胜煤田开发中人为泥石流发育现状及其分布特征. 山地学报, 2003, 21 (3): 354—359  
Wang W L, Li Z B, Zhang P C. The current situation of development about debris flows caused by human activities and its distribution characteristics in the exploitation in Shenfu-Dongsheng Coal Field (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2003, 21 (3): 354—359
- [ 13 ] 黄晓峰. 煤矿地质灾害特征及防治措施的探讨. 河南科技, 2013 (12): 185  
Huang X F. Discussion on characteristics of coal mine geological disasters and prevention measures (In Chinese). Journal of Henan Science and Technology, 2013 (12): 185
- [ 14 ] Hancock G R, Loch R J, Willgoose G R, et al. The design of post-mining landscapes using geomorphic principles. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28: 1097—1110
- [ 15 ] Nicolau J M. Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. Land Degradation & Development, 2003, 14: 215—226
- [ 16 ] 郝好鑫, 郭忠录, 王先舟, 等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程. 农业工程学报, 2017, 33 (8): 134—140  
Hao H X, Guo Z L, Wang X Z, et al. Rill erosion process on red soil slope under interaction of rainfall and scouring flow (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (8): 134—140
- [ 17 ] 张洪江. 土壤侵蚀原理. 北京: 中国林业出版社, 2000  
Zhang H J. Principle of soil erosion (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2000
- [ 18 ] 丁文斌, 史东梅, 何文健, 等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性. 农业工程学报, 2016, 32 (18): 153—161  
Ding W B, Shi D M, He W J, et al. Hydrodynamic characteristics of engineering accumulation erosion under side slope runoff erosion process in field scouring experiment (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (18): 153—161
- [ 19 ] 彭旭东, 江东, 史东梅, 等. 紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面产流产沙试验研究. 水土保持学报, 2013, 27 (3): 9—13  
Peng X D, Jiang D, Shi D M, et al. Experimental study on water runoff and sediment yield of different underlying surfaces of waste soil and residue in purple hilly area (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (3): 9—13
- [ 20 ] 韩鹏, 倪晋仁, 王兴奎. 黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究. 水利学报, 2003, 34 (1): 51—56  
Han P, Ni J R, Wang X K. Experimental study on gravitational erosion during development of rills on loess slope (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 (1): 51—56
- [ 21 ] 和继军, 孙莉英, 李君兰, 等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究. 农业工程学报, 2012, 28 (10): 138—144  
He J J, Sun L Y, Li J L, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (10): 138—144
- [ 22 ] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响. 农业工程学报, 2018, 34 (5): 114—119

- Zhang P, Yao W Y, Tang H W, et al. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (5): 114—119
- [23] Fox G A, Wilson G V. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (3): 717—733
- [24] Thomas J T, Iverson N R, Burkart M R. Bank-collapse processes in a valley-bottom gully, western Iowa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34 (1): 109—122
- [25] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度. *山地学报*, 2010, 28 (4): 415—421
- Chen X A, Cai Q G, Zhang L C, et al. Research on critical slope of soil erosion in a hilly loess region on the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2010, 28 (4): 415—421
- [26] 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. *农业工程学报*, 2015, 31 (17): 152—161
- Shi D M, Jiang G Y, Peng X D, et al. Runoff erosion process on slope of engineering accumulation with different soil-rock ratio (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (17): 152—161
- [27] 白玉洁, 张风宝, 杨明义, 等. 急陡黄土坡面薄层水流水力学参数变化特征. *土壤学报*, 2018, 55 (3): 641—649
- Bai Y J, Zhang F B, Yang M Y, et al. Variation of hydraulic parameters of shallow flow on steep loess slope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 641—649
- [28] 王文龙, 莫翼翔, 雷阿林, 等. 坡面侵蚀水沙流时间变化特征的模拟实验. *山地学报*, 2003, 21 (5): 610—614
- Wang W L, Mo Y X, Lei A L, et al. Simulating experiments of temporal change characteristics of runoff and sediment on slope (in Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2003, 21 (5): 610—614
- [29] Johnson K A, Sitar N. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27 (6): 789—801
- [30] Yamada S. The role of soil creep and slope failure in the landscape evolution of a head water basin: Field measurements in a zero order basin of northern Japan. *Geomorphology*, 1999, 28 (3): 329—344
- [31] 倪九派, 袁天泽, 高明, 等. 土壤干密度和含水率对2种紫色土抗剪强度的影响. *水土保持学报*, 2012, 26 (3): 72—77
- Ni J P, Yuan T Z, Gao M, et al. Effect of soil water content and dry density on soil shearing strength for calcareous purple soil and neutral purple soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (3): 72—77
- [32] 李建兴, 何丙辉, 谌芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响. *农业工程学报*, 2013, 29 (10): 144—152
- Li J X, He B H, Chen Y, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (10): 144—152

## Development of Rills on Slopes of Mine-Engineering Dumps and Its Relationship with Water and Sediment in Karst Area

LIN Zi<sup>1</sup> SHI Dongmei<sup>1†</sup> LOU Yibao<sup>1</sup> JIANG Gangyi<sup>2</sup> PENG Xudong<sup>3</sup> LI Yexin<sup>4</sup>

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 Chongqing Eco-environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147, China)

(3 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(4 College of Environment Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract** 【Objective】 Gravity is an important factor affecting development of runoff sediment and rills on slopes. Large piles of soil, rock and slag generated as waste and formed during the processes of coal

mine construction are liable to have inductive geological disasters such as collapse, landslides and debris flow, occur under the action of water and gravity, causing serious impact or even damage to surrounding water resources, land resources, vegetation resources, hydrological cycle and ecological environment quality. 【 Method 】 A few of such piles in a coal mining site of a karst zone were selected as object of the study. Field scouring experiments were conducted on slopes different in condition with varying flow to explore how erosion occurs and proceeds, and how gravity affects development of runoff and sediment and morphology of the rills formed. Field investigations found that the piles in the coal-mining areas of Chongqing varied in slope in the range between  $25.5^{\circ}$  and  $38^{\circ}$ . To objectively reflect characteristics of erosions on such piles different in stacking condition, the experiments were carried out on slopes different in gradient, i.e.  $25^{\circ}$   $30^{\circ}$   $35^{\circ}$  and  $40^{\circ}$ , and had five flow rates, i.e. 10, 15, 20, 25 and  $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  designed according to the characteristics of the per-unit width discharge caused by local rainstorms relative to duration and frequency and each round of the scouring experiment lasted 60 min. 【 Result 】 Results show:(1) The erosion on the slopes of the piles could be divided into two phases, sheet erosion (within the initial 3 min after runoff started) and rill erosion which could be further divided into three stages, i.e. rill expansion (3 ~ 24 min after runoff started), rill transition (24 ~ 30 min after runoff started) and rill stabilization (30 min after runoff started); the time of rill appearance on the slope was negatively related to the discharge flow rate and the slope; rills appeared the fastest in 4s and the slowest in 97 s, and the latter appeared about 24 times later than the former. (2) Gravity was an important factor affecting runoff-sediment yield and its fluctuations on the slopes of the piles. During slope erosion, runoff rate varied in the range between 7.77% and 374.25% in variation coefficient, while sediment yield did in the range of 1.75% ~ 1021%. Gravity could explain more than 17.41% or even up to 99.60% of the total sediment yield during slope erosion. It was tentatively concluded that gravity started to act on development of rills, when runoff and slope reached their respective critical value of  $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  and  $35^{\circ}$ . And (3) Runoff mainly caused rills to develop in depth, while gravity mainly did in width. The two leading functions were quite similar in degree of their effects on development of rills. Gravity turned short, shallow and narrow rills on slopes of loose deposit into long, deep and wide ones, which ranged between 7.89 and 19.73 cm in width between 2.17 and 7.73 cm in depth, between 2.12 and 4.36, in width/depth ratio and between  $1.35 \sim 3.00 \text{ m} \cdot \text{m}^{-2}$  in groove density. Mean depth and width of the rills increased with increasing flow rate and with increasing slope gradient, too. Under the same runoff conditions, the sediment yield increased with increasing density of the rills. However, density of the rills first increased and then decreased with increasing flow and slope gradient. 【 Conclusion 】 All the findings in this experiment are of important scientific significance to understanding correctly how runoff and sediment occurs and their influencing factors, to establishing models to predict soil erosion on slopes of the mine-engineering waste piles, and to elucidating . scientifically the roles of gravity in inducing collapse and landslide and maintaining slope stability of mine-engineering waste piles.

**Key words** Rill evolution; Gravity; Water-sediment relationship; Engineering waste piles; Mining project

(责任编辑: 檀满枝)