

# 神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验\*

李建明<sup>1</sup> 王文龙<sup>1,2\*\*</sup> 王贞<sup>3</sup> 罗婷<sup>4</sup> 李宏伟<sup>5</sup> 金剑<sup>6</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院-水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014; <sup>4</sup>杭州大地科技有限公司, 杭州 310000; <sup>5</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>6</sup>黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站, 甘肃庆阳 745000)

**摘要** 采用野外模拟降雨试验方法,研究了神府东胜煤田开采造成的弃土弃渣体产流产沙规律及其减水减沙效益。结果表明:随降雨强度的增大,弃土弃渣体产流的起始时间呈递减趋势,且差异达几倍至十几倍。弃渣体比弃土体更快到达稳定流速,平均流速大小为弃土体>沙多石少弃渣体>沙少石多弃渣体。弃土弃渣体产流6 min后的径流率达到稳定,与降雨强度呈显著相关。弃土弃渣体侵蚀主要发生在产流开始后的前6 min,弃土体产流后前6 min的平均含沙量是6 min后的0.43~4.27倍,弃渣体为1.43~54.93倍。弃土体和沙多石少弃渣体径流量与降雨强度呈线性函数关系,沙少石多弃渣体呈幂函数关系。弃土体和沙少石多弃渣体的次侵蚀量与降雨强度之间分别呈指数函数和幂函数相关。弃土体侵蚀量与径流量呈线性函数关系。在降雨强度为1.0和1.5 mm·min<sup>-1</sup>条件下,弃渣体采用鱼鳞坑及植被防护的产流滞后降雨时间为24 min,减水效益为29.5%~52.9%,减沙效益为85.7%~97.9%。

**关键词** 弃土弃渣体 野外降雨试验 产流 产沙 减水减沙 神府东胜煤田

**文章编号** 1001-9332(2013)12-3537-09 **中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

**A field experiment of runoff and sediment yielding processes from residues in Shenfu-Dongsheng Coalfield.** LI Jian-ming<sup>1</sup>, WANG Wen-long<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>3</sup>, LUO Ting<sup>4</sup>, LI Hong-wei<sup>5</sup>, JIN Jian<sup>6</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>Huadong Institute of Water Conservancy and Hydro-power Survey and Design Hydrochina Engineering Consulting Corporation, Hangzhou 310014, China; <sup>4</sup>Hangzhou Earth Science and Technology Co., Ltd, Hangzhou 310000, China; <sup>5</sup>College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>6</sup>Xifeng Experimental Station of Soil and Water Conservation, Qingyang 745000, Gansu, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2013 24(12): 3537-3545.

**Abstract:** The processes of runoff and sediment yields from and the benefits of water and sediment reductions by the residues produced in the Shenfu-Dongsheng Coalfield were investigated by a simulated field rainfall experiment. The runoff generation time generally presented a decreasing trend with increasing rainfall intensity, but varied widely with the change of residue compositions. Runoff from the slag reached a steady velocity faster than that from the spoil, and the average velocities of runoff from the residues were gradually decreased in the spoil, the slag with more sand and less stone, and the slag with less sand and more stone. Runoff rates for the residues reached a steady rate 6 min after runoff generation, and were significantly correlated with the rainfall intensities. Erosion on the residues mainly occurred in the first 6 min after runoff generation. Average sediment concentrations in the first 6 min were 0.43-4.27 times of those thereafter for the spoil, and 1.43-54.93 times for the slag. The runoff volume was a linear function of the rainfall intensity for the

\* 国家自然科学基金项目(40771127)、水利部公益性行业科研专项(201201048, 201201047, 201001036)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(10502-T1)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

2013-03-31 收稿, 2013-09-12 接受。

spoil and the slag with more sand and less stone, and was a power function of rainfall intensity for the slag with less sand and more stone. The relationships between single erosion and rainfall intensity for the spoil and the slag with less sand and more stone can be described by exponential and power functions, respectively. For the spoil, the erosion rate was a linear function of the runoff volume. When fish-scale pits and vegetation coverage were adopted on the surface of the slag, the generation of runoff lagged 24 min behind initial rainfall applications at intensities of 1.0 and 1.5 mm · min<sup>-1</sup>, and the runoff and sediment yields were reduced by 29.5% - 52.9% and 85.7% - 97.9%, respectively.

**Key words:** residues; simulated field rainfall experiment; runoff yield; sediment yield; water and sediment reductions; Shenfu-Dongsheng Coalfield.

随着我国经济迅猛发展,各项大型水利工程、交通运输、矿产开发及城镇建设等在建设施工中,对当地的生态环境造成严重破坏。煤炭开采过程中,剥离、排土、排矸、修路、建厂等活动加剧了矿区水土流失与生态破坏,尤其是中小型煤矿的无序开采,产生了大量的松散弃土弃渣堆积物,遇暴雨时产生严重的土壤侵蚀,同时伴随滑坡、崩塌、泥石流等重大灾害<sup>[1-2]</sup>。近年来,研究开发建设项目的水土流失规律及预测成为热点之一<sup>[3-4]</sup>。高学田等<sup>[5]</sup>调查了矿区松散堆积物的分布,得出其中 60.8% 堆积于河道,严重影响河床,发生洪水时导致侵蚀范围扩大。赵暄等<sup>[6]</sup>调查了陕西关中平原弃土堆置体 128 座,统计得出堆置体的坡度主要分布在 26° ~ 35°,坡长多集中在 2 ~ 8 m。王文龙等<sup>[7]</sup>、倪含斌等<sup>[8]</sup>分别采用野外放水及模拟降雨试验研究了神府矿区堆积弃土弃渣体水土流失规律,认为随着堆积年限延长,可蚀性降低。张乐涛等<sup>[9]</sup>研究神府地区高速公路堆积体陡坡侵蚀得出,坡面产沙过程存在产沙量突变、波动变化和稳定发展 3 个阶段,且土壤剥蚀率与单宽流量呈线性关系。针对弃渣场的边坡稳定性特征也进行了一些研究<sup>[10]</sup>。如为了减缓坡面水土流失,在坡面防护中常采用工程措施及植被措施等<sup>[11-12]</sup>。还有研究报道了不同下垫面侵蚀特征、矿区土壤与植被恢复及其效益的关系<sup>[13-18]</sup>。以往,采用野外降雨试验方法对弃土弃渣体径流产沙特征研究相对较少,对弃土弃渣体侵蚀规律及防护效益的综合分析研究更少。本试验采用野外模拟降雨方法,对神府东胜矿区煤炭开采过程中造成的弃土弃渣体的径流产沙规律及弃渣体防护效益进行系统研究,以期为生态建设和工矿区水土保持方案的制定提供指导。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验区概况

神府东胜煤田地处晋陕蒙三省交界处,包括陕

西省榆林地区的神木、府谷、榆林、横山、靖边 5 个县、内蒙古鄂尔多斯地区的伊金霍洛旗、达拉特旗、准格尔旗、东胜市和山西省忻州地区的保德县,属于风蚀水蚀交错区,自然条件十分恶劣,生态环境极度脆弱,是国家级水土流失重点监督区。本试验点位于神府东胜煤田神木县辖区,处于东胜矿区中心地带,是矿区开发强度最大、开发方式最多样的地区,具有典型性与代表性。通过实际考察与量算可知,矿区堆积弃土弃渣是该区人为加速侵蚀、泥石流、河道输沙与淤积、高含沙水流等形成的物质来源。本研究选取弃土体、沙多石少弃渣体、沙少石多弃渣体 3 种典型下垫面作为研究对象,基本代表了露天开采状况下弃土弃渣的实际,具有典型性。3 种下垫面的平均容重分别为 1.29、1.33 和 1.53 g · cm<sup>-3</sup>,弃土弃渣体的机械组成见表 1。根据美国制分级标准,弃土体中 > 2 mm 粗颗粒、砂粒、粉粒和粘粒各占 7.1%、90.3%、2.4% 和 0.2%,属于砂土;沙多石少弃渣体各占 45.1%、53.3%、1.5% 和 0.1%,属于轻砾石土;沙少石多弃渣体各占 69.3%、29.4%、1.2% 和 0.1%,属于中砾石土。

表 1 弃土弃渣体颗粒机械组成

Table 1 Mechanical composition for the residues (%)

粒径 Size (mm)	弃土体 Spoil	沙多石少弃渣体 Slag with more sand and less stone	沙少石多弃渣体 Slag with less sand and more stone
<0.002	0.2	0.1	0.1
0.002 ~ 0.005	0.4	0.1	0.1
0.005 ~ 0.01	0.5	0.2	0.2
0.01 ~ 0.025	0.6	0.4	0.3
0.025 ~ 0.05	0.9	0.8	0.6
0.05 ~ 0.1	13.4	5.7	3.2
0.1 ~ 0.25	28.6	7.7	4.4
0.25 ~ 0.5	35.3	9.3	6.0
0.5 ~ 1	7.7	10.3	7.1
1 ~ 2	5.3	20.3	8.6
2 ~ 5	3.0	33.0	21.2
5 ~ 10	2.5	8.4	34.3
10 ~ 20	1.6	3.7	13.9

### 1.2 试验设置

本次试验所选的下垫面均为矿区内的自然弃土弃渣坡面,选取坡度及下垫面状况需符合试验要求。本试验共设置 8 个小区,其中,弃土体 2 个,沙多石少弃渣体及沙少石多弃渣体各 3 个,试验小区面积为 3 m × 1 m。小区边界用铁板封闭并高出地面 15 cm、入土 10 cm,铁板边壁与地面结合处用铁铲压实,避免雨水沿接触面渗出,尽可能减小边界影响。小区下端设置钢制集水槽收集小区内径流。弃渣体采用植被和鱼鳞坑两种措施处理,其他布设与弃渣体一致。在试验区选取一块已有植被的弃渣体坡面,植被修成 50 cm 的一条带;鱼鳞坑直径 50 cm、深 30 cm,呈“品”字型布设<sup>[17,19]</sup>。人工模拟降雨强度按照当地暴雨发生频率分析得到,弃土弃渣体降雨强度设 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm · min<sup>-1</sup> 5 个级别,涵盖了该地区发生土壤侵蚀所有的侵蚀性降雨状况及发生侵蚀的最大雨强。通过矿区弃土弃渣体现场调查,堆积坡度大多处在 33° ~ 40°,本试验设 35° 和 40° 两个坡度;弃渣防护体试验设 1.0 和 1.5 mm · min<sup>-1</sup> 两个降雨强度,坡度 35°。

试验小区上方布设 2 m<sup>3</sup> 储水桶,采用 60 m 扬程的潜水泵将水抽至降雨装置。采用钢管搭建一个高 3 m 的降雨架,布设槽式人工模拟降雨机<sup>[20]</sup>,通过控制器调节喷头摆动频率实现较大范围雨强,均匀系数在 0.85 以上,雨滴分布接近天然降雨,高度为 3 m 时大部分雨滴可达终点速度。本试验在露天进行,为防止风对降雨分布的影响,在小区四周用布幕围成一圈。

每次降雨前后率定降雨强度,验证降雨过程中雨强的大小及降雨分布的均匀稳定性。降雨强度率定完毕,迅速掀开油布,自降雨开始至薄层径流汇集到小区出口时记录产流起始时间。产流开始的 3 min 内每 1 min 接 1 个水样,此后每隔 3 min 接 1 个水样。弃土弃渣体产流开始后降雨总时间为 45 min,通过实际观测及试验分析结果可知,弃渣防护体的径流含沙量在产流后 24 min 趋于稳定,因此产流后的降雨时间为 24 min。同时,采用高锰酸钾示踪法测定坡面的表面流速,由于测得的流速是径流表面的最大流速,雷廷武等<sup>[21]</sup>将测量得到的流速乘以系数 0.75 得到较为理想的水流平均流速,本试验亦采用该方法。试验结束后,用量筒测定各个径流样体积,用烘干法测定泥沙含量。

采用 Excel、SPSS 17.0 软件对试验数据进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区弃土弃渣体的产流特征

**2.1.1 产流起始时间对降雨强度的响应** 产流起始时间为降雨开始到薄层径流汇集到小区出口所需要的时间。由图 1 可以看出,随降雨强度的增大,产流起始时间呈递减趋势,弃土体变化趋势较弃渣体更显著。小降雨强度时,沙多石少弃渣体、沙少石多弃渣体的产流起始时间分别是弃土体的 1.28 和 2.30 倍,大降雨强度时分别为 4.79 和 11.67 倍。随着床面粒径的增大,产流起始时间延长,大雨强下更显著。弃土体在小坡度小降雨强度时入渗时间较长,形成径流所需要的时间也相对延长;大降雨强度下的入渗速率小于降雨强度从而形成超渗产流<sup>[11]</sup>,降雨不久后在坡面形成地表径流。弃渣体含有大量的孔隙,入渗速率远大于降雨强度,径流形成相对滞后于弃土体,大雨强下滞后 8.11 ~ 30.06 min。总体说来,产流起始时间为:沙少石多弃渣体 > 沙多石少弃渣体 > 弃土体。

弃土弃渣体的产流起始时间与降雨强度均呈显著负相关关系。其中,弃土体呈指数函数相关,弃渣体呈对数函数相关(表 2)。

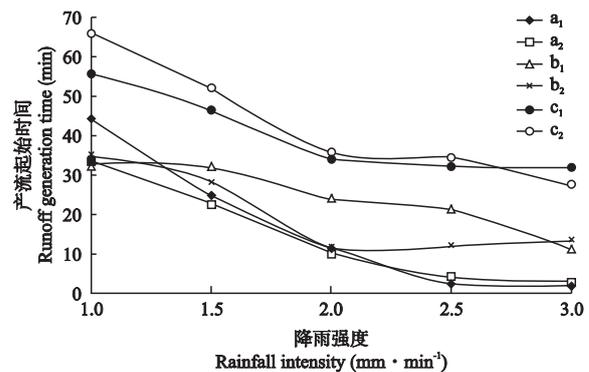


图 1 弃土弃渣体产流起始时间随降雨强度的变化  
Fig. 1 Variation of runoff generation time with rainfall intensity for the residues.

a) 弃土体 Spoil; b) 沙多石少弃渣体 Slag with more sand and less stone; c) 沙少石多弃渣体 Slag with less sand and more stone. 下同 The same below. 1) 坡度 35° Slop 35°; 2) 坡度 40° Slop 40°.

表 2 弃土弃渣体产流起始时间与降雨强度的关系  
Table 2 Relationships between runoff generation time and rainfall intensity for the residues (n = 10)

下垫面 Different surface	表达式 Equation	R <sup>2</sup>	P
a	$T_0 = 191.67e^{-1.49I}$	0.947	0.000
b	$T_0 = 35.41 - 20.93 \ln I$	0.790	0.001
c	$T_0 = 60.38 - 29.66 \ln I$	0.906	0.000

a) 弃土体 Spoil; b) 沙多石少弃渣体 Slag with more sand and less stone; c) 沙少石多弃渣体 Slag with less sand and more stone. T<sub>0</sub>: 产流起始时间 Runoff generation time (min); I: 降雨强度 Rainfall intensity (mm · min<sup>-1</sup>).

**2.1.2 径流流速特征** 径流流速可以反映坡面径流形态和侵蚀形式。由图 2 可以看出,弃土弃渣体的流速随降雨强度增大呈递增趋势(弃土体 40°除外),在侵蚀过程中呈跳跃性波动。弃土体、沙多石少弃渣体的稳定流速在  $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右波动,而沙少石多弃渣体的稳定流速随降雨强度增大而稳定增加。弃土体的流速总体在产流后 12 min 达到相对稳定,此后在小范围内波动,坡度 40° 的平均径流流速大于 35°。沙多石少弃渣体的流速在产流后 3 min 达到峰值,12 min 时各降雨强度下流速趋于稳定。总体说来,弃土体与沙多石少弃渣体流速变化规律相似,与沙少石多弃渣体差异较大,沙少石多弃渣体中砾石含量高,降雨后孔隙间细颗粒被带走,形成水流通道,改变径流流路,延长径流流程进而减缓流速。弃渣体比弃土体更快到达稳定流速,平均流速大小依次为弃土体 > 沙多石少弃渣体 > 沙少石多弃渣体,

主要是坡面流速大小与所含砾石含量相关。

由于坡面径流的流速主要取决于径流单宽流量、坡度和下垫面特征,本试验坡度大于以往试验坡度,加之弃土弃渣体经水流冲刷后形成的床面凹凸不平,改变流路,使得流速在侵蚀过程中始终处于波动。

**2.1.3 径流率特征** 雨滴击打地表,坡面可蚀性土粒被剥离,在径流的冲刷作用下进入水流并搬运出小区。因此,研究降雨过程中径流率的变化规律对于明确径流产沙及输沙机理具有重要意义。

弃土弃渣体的径流率随降雨强度的增大呈递增趋势(图 3)。弃土体的径流率在产流后 6 min 达到相对稳定;与弃土体相比,弃渣体的径流率在产流初期变化幅度较大,不同土体在相同降雨强度下的入渗状况不同,从而影响坡面径流变化。弃渣体的径流率在产流 6 min 内剧烈波动,主要是由于弃渣体的

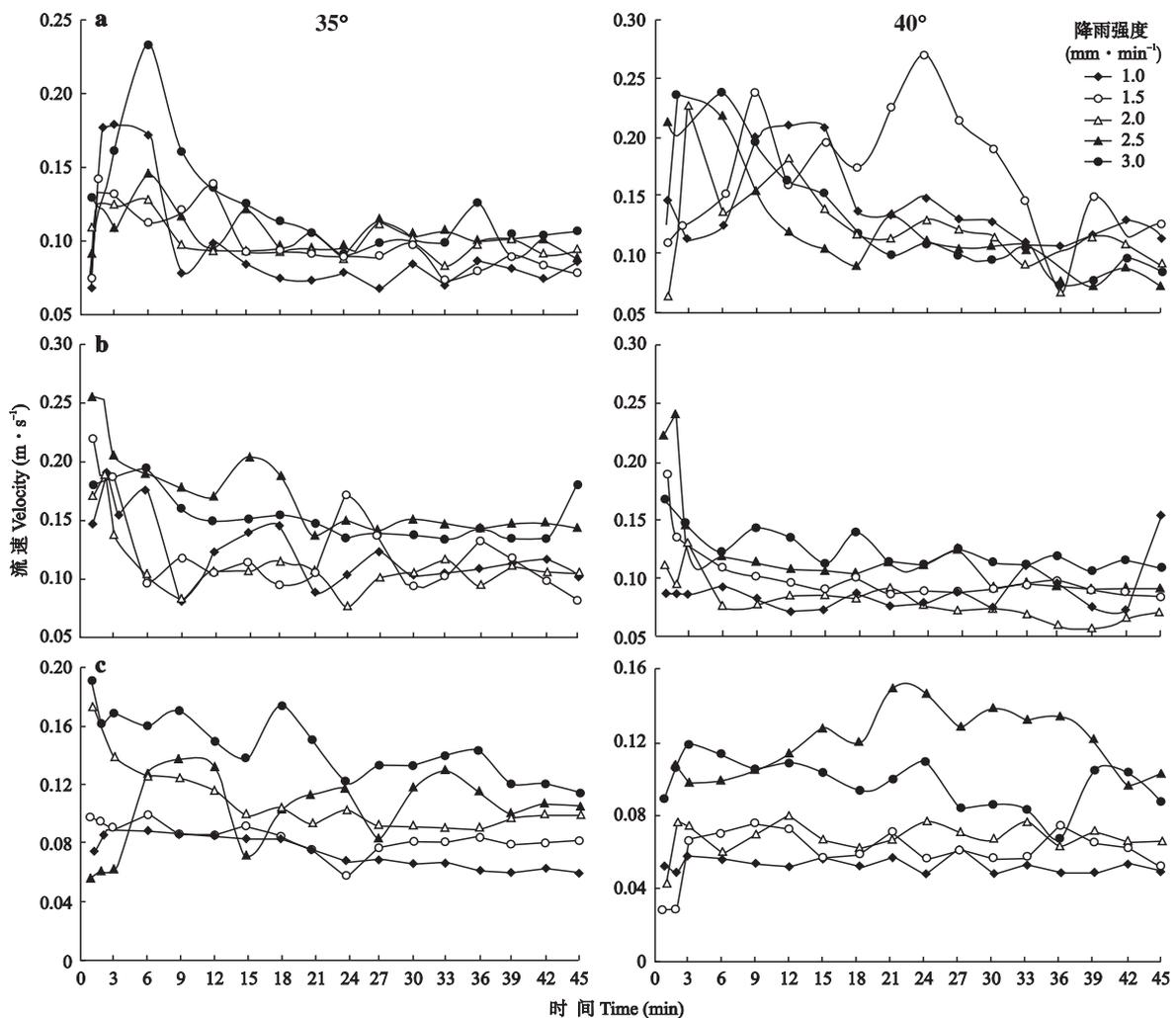


图 2 弃土弃渣体径流流速随时间的变化

Fig. 2 Variation of runoff velocity with time for the residues.

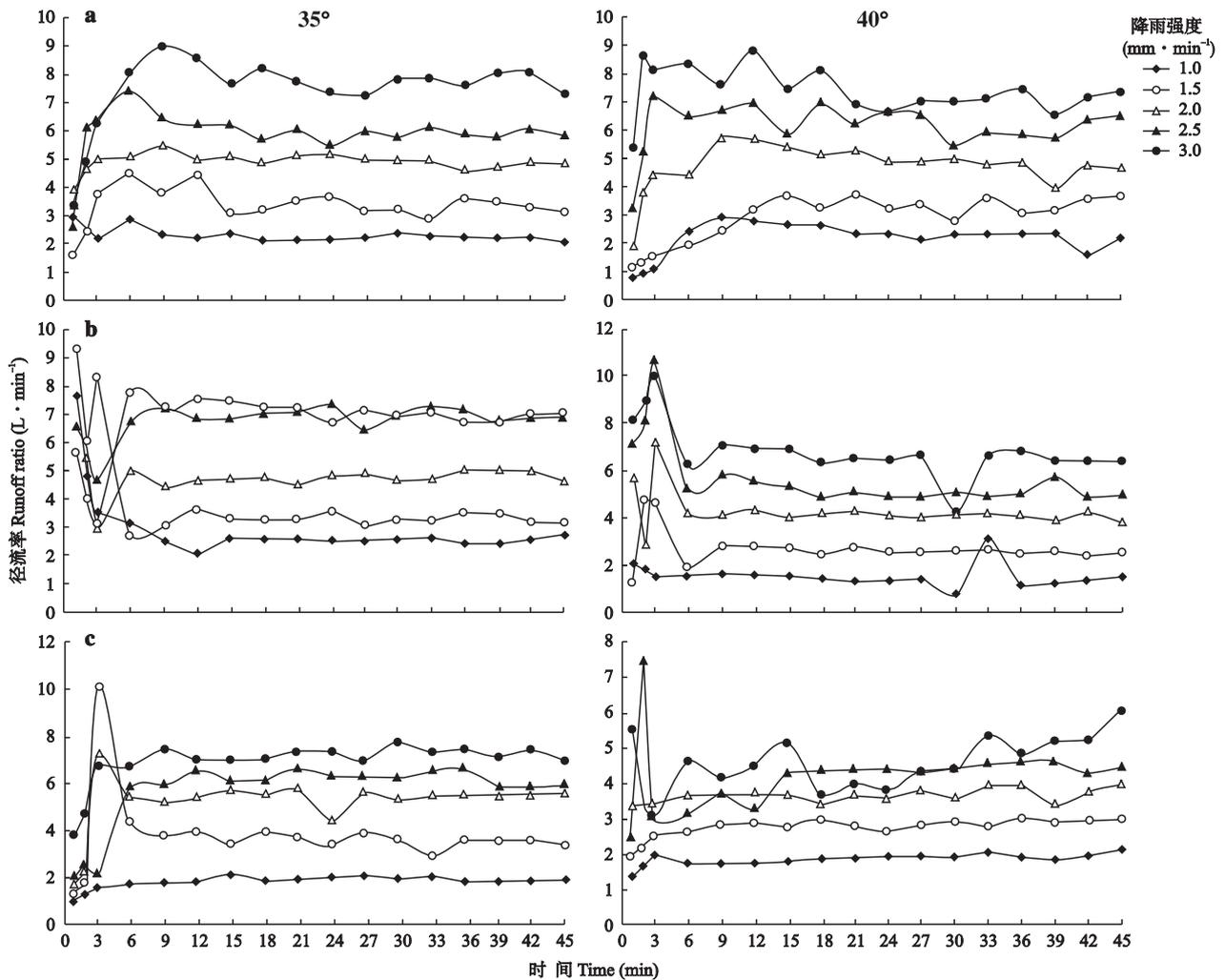


图3 弃土弃渣体径流率随时间的变化

Fig.3 Variation of runoff ratio with time for the residues.

颗粒粒径大,相同径流量下,可能对弃土体造成冲刷破坏,但对弃渣体却无法搬运冲刷.在  $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  降雨强度下,弃土弃渣体的径流率随时间变化较小,稳定在  $2.00 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ,由于小降雨强度下形成径流后,雨滴对薄层水流的打击作用力小,径流对坡面的剥蚀较轻,径流率保持稳定.弃土体、沙多石少弃渣体和沙少石多弃渣体产流后 6 min 的稳定径流率与降雨强度呈极显著相关.

## 2.2 弃土弃渣体的产沙特征

### 2.2.1 含沙量随时间的变化

土壤侵蚀过程中,含沙量的变化反映水沙关系的消长与演变.由图4可以看出,弃土体含沙量随侵蚀过程整体呈先增大后减小的趋势,由于弃土体表面容易被径流冲刷,随降雨持续,可蚀性土粒减少造成含沙量减小.坡度  $40^\circ$  时,降雨过程中含沙量不断波动是由于径流携沙会在某处发生堵塞,在重力和径流的冲刷下,突然迅速

下滑,形似小型泥石流,致使含沙量跳跃性增大和减小.弃渣体含沙量随降雨时间的延长整体出现急剧增大或迅速减小的趋势,这与王文龙等<sup>[7]</sup>研究结果相近.坡度  $40^\circ$  时,由于径流对弃渣体表面累积冲刷,砾石被冲走,造成在后期某段时间内含沙量突然递增.弃土弃渣体含沙量的变化规律可分为两个阶段:坡度  $35^\circ$  时,产流后的前 6 min,平均含沙量依次为沙多石少弃渣体 > 弃土体 > 沙少石多弃渣体,6 min 后的平均含沙量为弃土体 > 沙多石少弃渣体 > 沙少石多弃渣体,弃土体产流后的前 6 min 平均含沙量是 6 min 后平均含沙量的 2.30 ~ 4.27 倍,沙多石少弃渣体为 20.66 ~ 54.93 倍,沙少石多弃渣体为 3.45 ~ 21.08 倍;坡度  $40^\circ$  时的平均含沙量与坡度  $35^\circ$  时相同,弃土体产流后的前 6 min 平均含沙量为 6 min 后平均含沙量的 0.43 ~ 2.76 倍,沙多石少弃渣体为 2.78 ~ 50.07 倍,沙少石多弃渣体为 1.43 ~

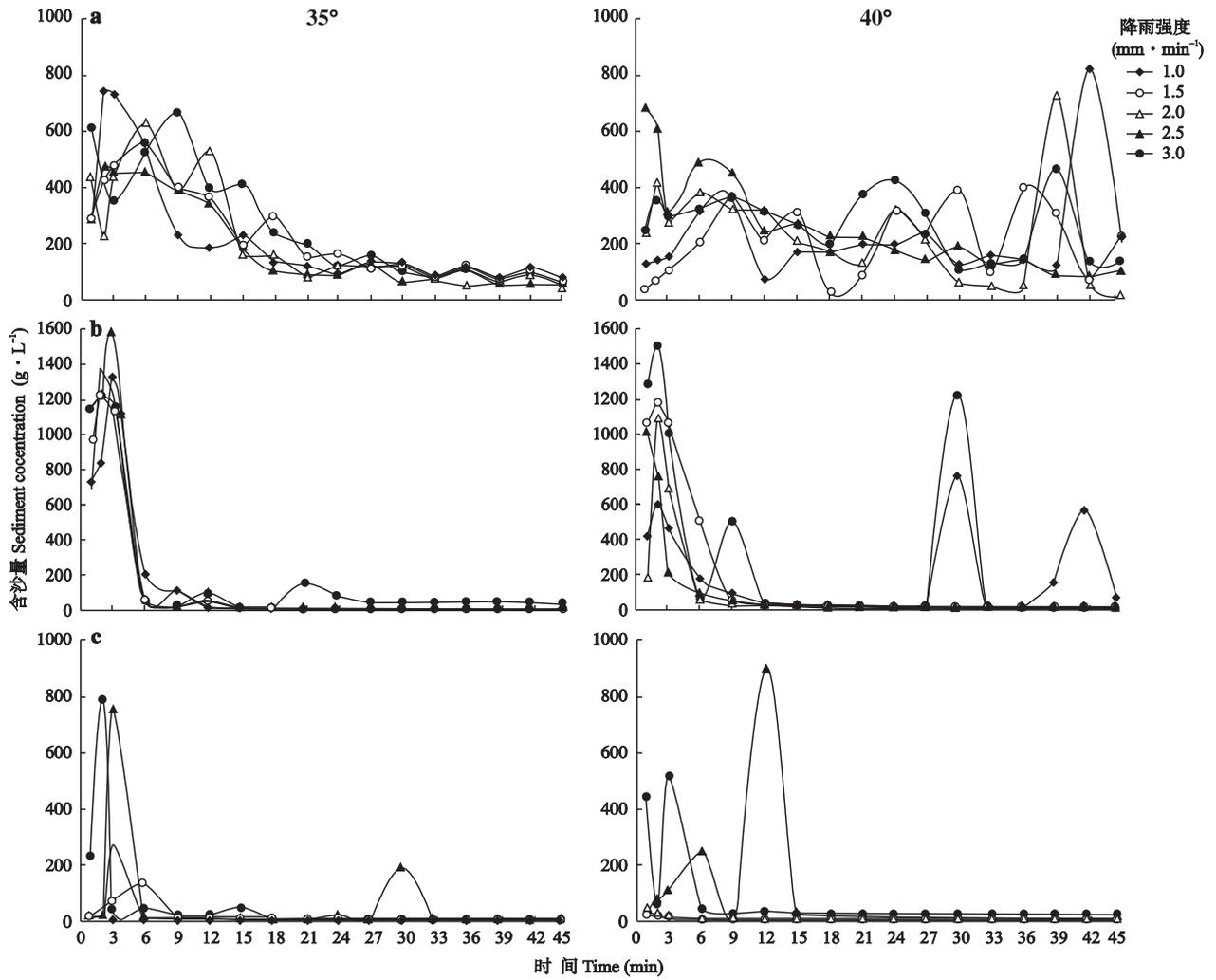


图4 弃土弃渣体含沙量随时间的变化  
 Fig. 4 Variation of sediment concentration with time for the residues.

10.33 倍. 与弃土体相比, 弃渣体的侵蚀主要发生在产流初期, 后期形成稳定流路, 含沙量减少.

当坡面发生侵蚀后, 被剥离的土粒进入水流并流出口; 随侵蚀过程延续, 坡面表层细颗粒减少, 径流的侵蚀能力与坡面的抗蚀能力处于相对平衡状态, 坡面侵蚀趋于稳定, 含沙量逐渐减小. 与自然土体相比, 弃土弃渣体颗粒之间的粘性较小, 在水流冲击力及重力下快速分散, 细颗粒随水流快速流出, 后期由于砾石之间的固结支撑作用形成稳定床面, 水流中仅含有少量细颗粒.

**2.2.2 弃土弃渣体径流产沙关系** 降雨径流是侵蚀产沙的主要动力因素, 且以径流冲刷为主. 不同的径流量代表着不同的侵蚀动力, 因此, 明确产沙量与径流量之间的关系尤为重要. 在一定降雨历时条件下, 次降雨径流总量 ( $W, L \cdot m^{-2}$ ) 与降雨强度 ( $I$ ) 的关系更为密切. 弃土体 (a) 和沙多石少弃渣体 (b) 次降

雨径流总量与降雨强度的关系可用线性函数表示, 沙少石多弃渣体 (c) 可用幂函数表示, 具体表达式如下:

$$W_a = 120.53 - 23.98I \quad (R^2 = 0.990, n = 10, P = 0.000) \quad (1)$$

$$W_b = -16.55 + 110.40I \quad (R^2 = 0.917, n = 10, P = 0.000) \quad (2)$$

$$W_c = 90.65I^{1.01} \quad (R^2 = 0.841, n = 10, P = 0.000) \quad (3)$$

弃土体和沙少石多弃渣体的次降雨侵蚀总量 ( $M_s, kg \cdot m^{-2}$ ) 与降雨强度呈极显著相关, 可分别用指数函数和幂函数表示, 沙多石少弃渣体的次降雨侵蚀总量与降雨强度呈显著相关, 可用指数函数表示. 具体表达式如下:

$$M_{s_a} = 13.31e^{0.67I} \quad (R^2 = 0.953, n = 10, P = 0.000) \quad (4)$$

$$M_{s_b} = 0.35I^{3.50} \quad (R^2 = 0.859, n = 10, P = 0.000) \quad (5)$$

$$M_{s_c} = 13.31e^{0.066I} \quad (R^2 = 0.484, n = 10, P = 0.025) \quad (6)$$

弃土体的侵蚀总量与径流总量之间呈线性函数关系, 弃渣体的侵蚀总量与径流总量可用指数函数表示, 具体表达式如下:

$$M_{s_a} = -8.547 + 0.299W \quad (R^2 = 0.92, n = 10, P = 0.000) \quad (7)$$

$$M_{s_b} = 10.961e^{0.006W} \quad (R^2 = 0.53, n = 10, P = 0.017) \quad (8)$$

$$M_{s_c} = 0.138e^{0.017W} \quad (R^2 = 0.69, n = 10, P = 0.003) \quad (9)$$

### 2.3 弃渣防护体减水、减沙效益分析

**2.3.1 减水效益** 由图 5 可以看出, 沙多石少弃渣体中, 未处理弃渣体径流率随时间呈递减趋势, 6 min 后趋于稳定, 鱼鳞坑及种草防护后弃渣体的径流率稳定在 0.71 ~ 2.84 L · min<sup>-1</sup>, 径流率大小为未处理 > 种草 > 鱼鳞坑. 沙少石多弃渣体中, 未处理弃渣体在 1.5 mm · min<sup>-1</sup> 降雨强度下的径流率随产流历时先迅速递增后又递减, 6 min 后趋于稳定, 其他降雨强度下径流率变化较小, 集中在 0.76 ~ 2.96 L · min<sup>-1</sup>; 两种防护措施处理后的径流率均随侵蚀过程而递增, 且两种防护措施径流率差别不显著,

原因在于内部含较多大孔隙, 雨水渗透快; 与未防护弃渣体相比, 两种防护措施均能起到减水效果. 沙多石少弃渣体中, 采用植被及鱼鳞坑防护的减水效益分别为 34.5% 和 52.9%, 沙少石多弃渣体分别为 44.6% 和 29.5%.

**2.3.2 减沙效益** 由图 5 可以看出, 鱼鳞坑及植被防护后弃渣体的含沙量在产流前 3 min 内随侵蚀过程变化较大. 沙多石少弃渣防护体两种处理措施的含沙量在产流 15 min 后均稳定于 13 g · L<sup>-1</sup>. 鱼鳞坑及植被处理都能较好地减少径流对弃渣体坡面的侵蚀, 这种表现在侵蚀初期尤其明显. 产流开始后的前 3 min, 未处理弃渣体的含沙总量是鱼鳞坑处理后的 27.82 倍, 是植被处理的 11.88 倍; 此后, 含沙量的值逐渐趋于接近. 采用鱼鳞坑和植被处理能较好地减少弃渣体的侵蚀量, 尤其在侵蚀初期的防护作用更加明显.

降雨强度为 1.0 和 1.5 mm · min<sup>-1</sup> 时, 沙多石少弃渣体采用植被防护的减沙效益为 95.9%, 鱼鳞坑防护后的减沙效益为 97.9%; 沙少石多弃渣体分别为 91.4% 和 85.7%. 说明鱼鳞坑和植被都能较好地防护弃渣体坡面, 防止产生严重侵蚀.

在弃渣体坡面采用鱼鳞坑措施可以起到很好的拦蓄作用, 通过改变坡面局部地形, 增加地面粗糙度以减少径流侵蚀能力; 而植被措施有利于增加入渗

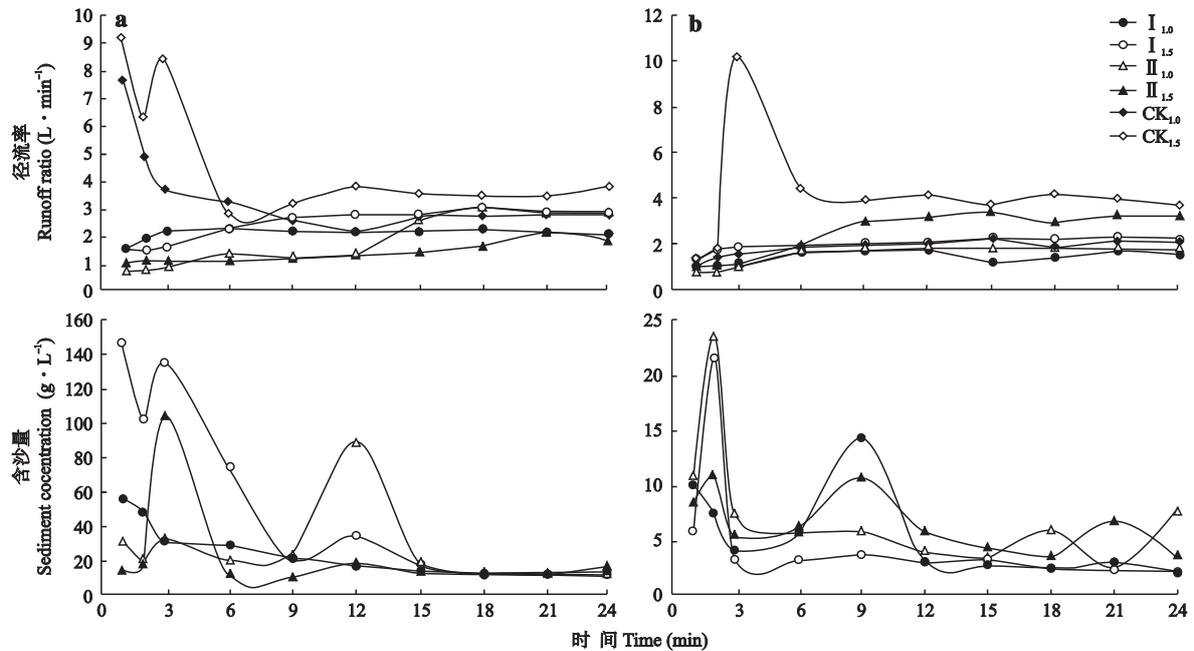


图 5 弃渣防护体径流率和含沙量随时间的变化

Fig. 5 Variation of runoff ratio and sediment concentration with time for the protected slag.

a) 沙多石少弃渣体 Slag with more sand and less stone; b) 沙少石多弃渣体 Slag with less sand and more stone. I: 种草 Vegetation protection; II: 鱼鳞坑 Fish-scale pits protection; CK: 未处理 Unprotected.

和下垫面的持水能力.二者均能起到蓄水拦沙效果.

### 3 讨 论

本研究以矿区弃土体、沙多石少弃渣体及沙少石多弃渣体 3 种典型下垫面为研究对象,分析弃土弃渣体的侵蚀产沙规律,并对弃渣防护体减水、减沙效果进行初步探讨.结果表明,弃土弃渣体的产流起始时间随降雨强度增大呈递减趋势;径流率随降雨强度呈显著递增趋势,6 min 后趋于稳定,稳定径流率与降雨强度呈显著相关.

弃土弃渣体的土壤侵蚀主要发生在产流后的前 6 min.弃土体产流后的前 6 min 平均含沙量是 6 min 后的 0.43~4.27 倍,弃渣体为 1.43~54.93 倍.径流总量与降雨强度呈显著相关,弃土体和沙多石少弃渣体呈线性函数相关,沙少石多弃渣体呈幂函数关系.弃土体和沙少石多弃渣体的侵蚀总量与降雨强度呈指数函数和幂函数关系.弃土体侵蚀总量与径流总量呈线性函数关系.王文龙等<sup>[22]</sup>通过野外冲刷方法研究矿区扰动地面,认为径流量与侵蚀量之间呈水大沙多的特点.本研究中弃土体的水沙关系与其相近.由于坡面侵蚀的主要营力来自于径流冲刷,且扰动地面及弃土体之间都经过强烈的人为扰动,使得下垫面结构破坏,易遭受侵蚀.弃渣体由于独特的颗粒组成,侵蚀主要发生在降雨初期,侵蚀量与径流量关系不显著.

在降雨强度为 1.0 和 1.5 mm·min<sup>-1</sup> 条件下,弃渣体采用鱼鳞坑及植被防护,产流滞后降雨时间为 24 min,与同等条件未防护的弃渣体相比,减水效益为 29.5%~52.9%,减沙效益为 85.7%~97.9%,这与张强等<sup>[23]</sup>、吴淑芳等<sup>[11]</sup>、游珍等<sup>[17]</sup>等研究结果相近.他们认为,植被能够减少坡面径流量和产沙量.坡面植被在径流作用下匍匐于坡面,增加了坡面糙率,降低了流速,削弱了径流侵蚀能力,而采用聚流坑或鱼鳞坑措施改变坡面局部地形,坡面径流被收集,增加入渗,且被侵蚀泥沙定向富集于坑内,导致小区出口处侵蚀量减少.郑世清等<sup>[24]</sup>通过对比植物路与土质路的侵蚀过程,认为植物路面有利于减少坡面产沙量,同时会增加坡面径流量且增加幅度远大于减沙量幅度.其差异可能是由于本试验弃土弃渣体的颗粒机械组成、硬实度与天然路面有较大区别,且坡度>35°,水力与重力共同作用造成侵蚀规律的差异性.本文初步探讨了植被和鱼鳞坑措施对弃渣体坡面的防护效益,有一定的局限性,对于不同矿区具体采取何种工程、林草措施等才能有效防止

弃土弃渣体水土流失还有待进一步研究.

### 参考文献

- [1] Wang W-L (王文龙), Li Z-B (李占斌), Zhang P-C (张平仓). Environmental disaster issues induced by coal exploitation in Shenfu-Dongsheng coal field. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, 23(1): 34-38 (in Chinese)
- [2] Santi PM, deWolfe VG, Higgins JD, et al. Sources of debris flow material in burned areas. *Geomorphology*, 2008, 96: 310-321
- [3] Song X-Q (宋晓强), Zhang C-Y (张长印), Liu J (刘洁). Formation of soil and water loss and its characteristics in development and construction projects. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2007, 27(5): 108-113 (in Chinese)
- [4] Dong JZ, Zhang KL, Guo ZL. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study. *Transportation Research Part D*, 2012, 17: 8-14
- [5] Gao X-T (高学田), Tang K-L (唐克丽), Zhang P-C (张平仓), et al. New man-made accelerated erosion during the first and second period construction of the Shenfu-Dongsheng Coal Mining Area. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 1994, 1(4): 23-34 (in Chinese)
- [6] Zhao X (赵暄), Xie Y-S (谢永生), Jing M-X (景民晓), et al. Standardization parameter for spoilbank underlying surface simulation of development construction project. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, 26(5): 229-234 (in Chinese)
- [7] Wang W-L (王文龙), Li Z-B (李占斌), Li P (李鹏), et al. Scouring experiment on residues of Shenfu-Dongsheng Coalfield during exploitation. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, 18(5): 68-71 (in Chinese)
- [8] Ni H-B (倪含斌), Zhang L-P (张丽萍), Zhang D-R (张登荣), et al. Simulated rainfall experiments on soil and water erosion in different phases of resources exploitation in Shendong mine region. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, 26(12): 2065-2071 (in Chinese)
- [9] Zhang L-T (张乐涛), Gao Z-L (高照良), Li Y-H (李永红), et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2013, 29(8): 145-153 (in Chinese)
- [10] Liu J-W (刘建伟), Shi D-M (史冬梅), Ma X-G (马晓刚), et al. Stability characteristics analysis on side-slopes of excavation waste dump. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2007, 21(5): 192-195 (in Chinese)
- [11] Wu S-F (吴淑芳), Wu P-T (吴普特), Song W-X (宋维秀), et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow

- and sediment reduction. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2010, **41**(7): 870 – 875 (in Chinese)
- [12] Zhang Q (张强), Zheng S-Q (郑世清), Tian F-X (田风霞), et al. Runoff and sediment processes and anti-erosion effects of grass-covered earth road in loess hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1785 – 1791 (in Chinese)
- [13] Haigh MJ, Gentcheva-Kostadinova SV. Ecological erosion control on coal-spoil banks: An evaluation. *Ecological Engineering*, 2002, **18**: 371 – 377
- [14] Heras MM, Nicolau JM, Espigares T. Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment. *Ecological Engineering*, 2008, **34**: 168 – 178
- [15] Zhao ZQ, Shahrour I, Bai ZK, et al. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **55**: 40 – 46
- [16] Zhang X-M (张晓明), Yu X-X (余新晓), Wu S-H (武思宏), et al. Effects of forest vegetation on runoff and sediment production on sloping lands of Loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(9): 1613 – 1617 (in Chinese)
- [17] You Z (游珍), Li Z-B (李占斌). Mechanism and experiment of vegetation on slope to reduce runoff and sediment. *Journal of Sediment Research* (泥沙研究), 2011(3): 59 – 62 (in Chinese)
- [18] Dutta RK, Agrawal M. Restoration of opencast coal mine spoil by planting exotic tree species: A case study in dry tropical region. *Ecological Engineering*, 2003, **21**: 143 – 151
- [19] Wang P (王萍), Wang K-Q (王克勤), Li T-X (李太兴), et al. Regulation effects of reverse-slope level terrace on the runoff and sediment yield in sloping farmland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(5): 1261 – 1267 (in Chinese)
- [20] Zhang G-H (张光辉), Liu B-Y (刘宝元), Li P-K (李平康). Principles and properties of artificial trough rainfall simulator. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2007, **27**(6): 56 – 60 (in Chinese)
- [21] Lei T-W (雷廷武), Zhang Q-W (张晴雯), Yan L-J (闫丽娟). The Physical Model of Rill Erosion. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [22] Wang W-L (王文龙), Wang Z-Y (王兆印), Li Z-B (李占斌), et al. Study on the simulation of runoff and sediment yield on the disturbed lands during the Shenfu-Dongsheng coalfield exploitation. *Journal of Sediment Research* (泥沙研究), 2006(2): 60 – 64 (in Chinese)
- [23] Zhang Q (张强), Zheng S-Q (郑世清), Tian F-X (田风霞), et al. Runoff and sediment yield characteristics of earth road under artificial rainfall and simulated overland flow tests conditions in Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(5): 83 – 87 (in Chinese)
- [24] Zheng S-Q (郑世清), Tian F-X (田风霞), Wang Z-L (王占礼), et al. Comparison tests on runoff and sediment yield process from earth road and plant-covered road in loess hilly region. *Journal of Sediment Research* (泥沙研究), 2009(4): 1 – 6 (in Chinese)

---

作者简介 李建明,男,1989年生,硕士研究生。主要从事开发建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hahalijianming@126.com

责任编辑 杨弘

---