

神府东胜煤田弃土弃渣体径流水动力学特性研究

张孝中¹, 王文龙^{2,3}, 李建明²

(1. 陕西省水土保持勘测规划研究所, 陕西 西安 710004; 2. 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; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 对神府煤田开发建设过程中造成的弃土弃渣体的径流水动力学特性进行研究, 并分析土壤剥蚀率与各水动力学参数之间的关系。[方法] 采用野外模拟降雨试验方法。[结果] (1) 弃土弃渣体的土壤剥蚀率 D_r 随雨强增大显著线性递增; (2) 雷诺数 R_e 总体上随着雨强增大而增大, 随降雨历时先增大后保持稳定; 佛罗德数 F_r 受雨强影响不显著, 在产流 0~12 min 内波动较大, 随后在某一常数附近上下波动; 阻力系数 f 随降雨历时呈递增趋势, 受雨强影响不显著, 次降雨平均阻力系数 f 大小表现为: 沙少石多弃渣体 > 弃土体 > 沙多石少弃渣体; (3) 各下垫面土壤剥蚀率 D_r 与水流剪切力、水流功率 P 之间均呈显著的线性函数关系。[结论] 研究区不同类型下垫面次降雨径流水动力学参数变化各具特点, 土壤剥蚀率与各水动力学参数之间存在显著相关关系。

关键词: 弃土弃渣体; 模拟降雨; 水动力学参数; 土壤剥蚀率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0076-06

中图分类号: S157.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.015

Hydrodynamic Characteristics of Runoff over Abandoned Slags in Shenfu—Dongsheng Coalfield

ZHANG Xiaozhong¹, WANG Wenlong^{2,3}, LI Jianming²

(1. Shaanxi Provincial Planning and Research Institute of Soil and Water Conservation, Xi'an, Shaanxi 710004, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Hydrodynamic characteristics of runoff over abandoned slags derived from the development and construction of the Shenfu—Dongsheng coal field were studied and the relationships between soil detachment rate and hydrodynamic parameters were analyzed. [Methods] Field simulated rainfall experiment was conducted. [Results] (1) Soil detachment rate (D_r) for the abandoned slags significantly linearly increased with increasing rainfall intensity; (2) Reynolds number (R_e) for the abandon slags generally increased as rainfall intensity increased, but its increase with rainfall duration showed an increasing trend at first and then maintained a stable trend. However, rainfall intensity did not affect Froude number (F_r) significantly. The F_r fluctuated violently 12 min after runoff generation and then fluctuated around a constant value. The drag coefficient (f) presented an increasing trend with rainfall duration, but the effect of rainfall intensity on the f was not significant. The abandoned slags studied, in order of decreasing average drag coefficient for a single rainfall, were the slag with less sand and more stone, abandoned soil body and slag with more sand and less stone; (3) The averaged soil detachment rate for each of the three underlying surfaces was a significantly linear function of shear force (τ) and stream power (P). [Conclusion] For the different types of underlying surfaces in the studied area, the variations of hydrodynamic parameters of runoff induced by single rainfall have their own characteristics. Soil detachment rate is significantly correlated with the hydrodynamic parameters.

Keywords: abandoned slag; simulated rainfall; hydrodynamic parameter; soil detachment rate

收稿日期: 2014-03-19

修回日期: 2014-04-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“煤矿开发建设中人为侵蚀机理及新增水土流失预报模型: 以神府煤田为例”(40771127); 水利部公益性行业专项(201201047; 201201048)

第一作者: 张孝中(1961—), 男(汉族), 陕西省澄城县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土流失动态规律及生态恢复方面的研究。E-mail: zxz211@126.com。

神府东胜煤田的开发,确保了国家优质动力煤的稳定供应,促进国民经济的快速发展,但煤炭开采过程中扰动地表、修路、修建临时措施、弃土弃渣随意堆放等都会对矿区的环境造成严重破坏,产生一系列的环境问题^[1-3]。为了更加准确地预测矿区新增水土流失,许多学者针对神府东胜煤田的土壤侵蚀现状展开了大量研究,张胜利^[4]等在调查研究及室内外试验基础上,分析了煤炭开采对侵蚀和产沙的影响,认为煤田开发会加重水土流失;李强、罗婷等^[5-6]针对神府煤田不同下垫面径流产沙特征进行了详细研究。调查发现,矿区中堆放的大量弃土弃渣体是矿区新增水土流失的主要策源地之一。

对矿区弃土弃渣的研究主要通过野外调查及野外放水冲刷试验^[7-8]。为了更加明确土壤侵蚀的内在机理,学者们开展了大量的水动力学试验研究,魏霞等^[9]采用室内放水冲刷试验研究水动力学特性,结果表明雷诺数随冲刷历时增大而增大,流速沿程有先增大后减小趋势;张科利等^[10]运用水力学理论及试验结果,提出了水动力学参数计算公式;王贞等^[11]对比分析了神府煤田扰动地面及原生地面的水动力学参数,发现扰动地面的雷诺数和阻力系数均大于原地面,佛罗德数差异不显著。目前,针对矿区不同下垫面侵蚀产沙特性的研究较多,对矿区弃土弃渣体的径流产沙规律也进行了大量的试验研究,但针对弃土弃渣体的水动力学特性试验研究鲜见有报道。本文采用野外人工模拟降雨试验,研究矿区弃土弃渣体径流水动力学特性,以期为明确矿区弃土弃渣体土壤侵蚀内在机理研究提供一定的科学理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

神府东胜煤田地处晋陕蒙三省交界处(北纬 $37^{\circ}20'$ — $40^{\circ}16'$,东经 $108^{\circ}36'$ — $110^{\circ}36'$),位于黄土丘陵与鄂尔多斯台地的过渡地带,包括黄土丘陵、风沙丘陵与砒沙岩地貌类型,是典型的生态脆弱区。总面积约 $3\,481\text{ km}^2$,煤炭地质储量 $3.54\times 10^{10}\text{ t}$,探明储量占全国煤炭保有储量的 $1/4$ 。该区为典型的干旱半干旱大陆季风性气候,年平均气温 $6.1\sim 9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量不足 400 mm ,降水多集中在多集中于

7—9月,占全年降雨的 $65\%\sim 70\%$,分布趋势由东南向西北逐渐减少。年蒸发量为 $1\,636\sim 2\,535\text{ mm}$,蒸发强烈。黄土是本区的最主要地面物质,分布面积约占 63.63% 以上,一般质地较粗,抗蚀性、结构性较差,是易侵蚀的主要物质之一。

1.2 试验布设与方法

试验区位于神木县西沟乡六道沟煤矿。选取弃土体、沙多石少弃渣体、沙少石多弃渣体3种不同类型下垫面,土壤机械组成见表1。试验小区长 3 m ,宽 1 m ,四周采用高 30 cm ,厚 2 mm 的钢板控制边界条件,钢板露出地面 10 cm ,以防止径流渗漏。为降低边界效应,靠近板壁处土体应尽量压实。下垫面坡度根据研究区弃土弃渣体典型坡度选择为 35° 。降雨强度按照神府东胜地区多年降雨频率气象资料分析,根据20年一遇频率标准,采用 $1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{ mm/min}$ 5个雨强级别。

采用水泵将水抽至小区上部放置的 2 m^3 的储水桶内,通过 60 m 扬程的潜水泵将水抽出进行降雨,设置双阀门和压力表调节降雨强度。试验露天进行,采用钢管搭建一个高 3 m 的降雨架,为防止风对降雨分布的影响,在小区四周用彩条布围一圈,小区正上方布设下喷式降雨器。为保证降雨强度达到试验要求,在降雨试验开始前,需要率定降雨强度,保证率定雨强与设计雨强误差不超过 5% ,雨强率定完毕,迅速揭开遮雨布并开始计时。自降雨开始至坡面有较明显径流形成并流出小区出口时记录产流起始时间,产流开始后的 3 min 内每 1 min 接一个水样, 3 min 后每隔 3 min 接一个水样。设置产流开始后降雨总时间为 45 min 。同时在各小区中间部位分别设置两个 1 m 长的观测断面,以便测定流速、水深及流宽;径流流速测定采用高锰酸钾示踪法,由于测得的流速是径流表面的最大流速,雷廷武等^[12]将染色剂测量得到的流速乘以系数 0.75 来得到较为理想的水流平均流速,本试验亦以此法得到水流平均速度;用薄钢尺在测量断面处测径流宽度;在观测断面内选取三点分别用薄钢尺测定径流深,以平均值作为整个小区的径流深。试验结束后,用量筒测定各个径流样体积,采用烘干法测定泥沙量。采用SPSS18.0进行数据处理分析。

表 1 弃土弃渣体颗粒机械组成

粒径/mm	<0.002	0.002~ 0.005	0.005~ 0.01	0.01~ 0.025	0.025~ 0.05	0.05~ 0.1	0.1~ 0.25	0.25~ 0.5	0.5~1	1~2	2~5	5~10	10~20
弃土体/%	0.15	0.42	0.48	0.63	0.90	13.42	28.60	35.28	7.67	5.34	2.96	2.52	1.63
沙多石少弃渣体/%	0.08	0.12	0.23	0.41	0.77	5.67	7.74	9.34	10.33	20.25	32.97	8.35	3.74
沙少石多弃渣体/%	0.05	0.11	0.19	0.32	0.58	3.23	4.45	5.96	7.13	8.65	21.21	34.27	13.85

2 结果与分析

2.1 弃土弃渣体平均土壤剥蚀率随雨强变化

坡面水蚀过程的土壤剥蚀率为单位时间单位面积上土体在侵蚀动力的作用下被剥蚀掉的土壤颗粒的量^[13]。次降雨平均土壤剥蚀率是指次降雨过程中各时段土壤剥蚀率的平均值,以 D_r 表示,可以反映出径流对下垫面表层的冲刷、剥蚀能力。表 2 为各下垫面在不同雨强下次降雨平均土壤剥蚀率。分析表 2 可知,弃土弃渣体的 D_r 随雨强增大显著递增 ($p < 0.01$),随降雨强度的增大,一方面,单位时间单位面积内下垫面的承雨量增加,径流强度增大,冲刷能力增强;另一方面,雨滴直径增大,对地表的冲击能力增强,溅蚀作用强烈。3 种不同下垫面 D_r 值的大小顺序为:沙多石少弃渣体 > 弃土体 > 沙少石多弃渣体,这主要是由于 3 种下垫面的物质组成不同,弃土体中砾石含量较少,其土壤结构类似于原生地面,具有一定的抗侵蚀能力;沙多石少弃渣体中含有一定量(约 45%)砾石,而下垫面表层砾石存在使得土粒之间的黏结性减弱,在雨水冲刷过后很快随径流流失,砾石存在使得下垫面的抗蚀能力降低,且表层易侵蚀性颗粒多,各雨强条件下土壤剥蚀率最大;沙少石多弃渣体中砾石含量较大(约 70%),在下垫面的表层形成一定的固相骨架,而弃土则分布在砾石空隙之间,由于可供侵蚀的物质源较少,导致总体的 D_r 值最小。与弃土体相比,沙多石少弃渣体的 D_r 为弃土体的 1.85~2.76 倍,而沙少石多弃渣体仅为弃土体的 0.57%~21.30%。可见,矿区严重的土壤侵蚀可能是由于含砾石弃渣体的随意堆放造成的,在矿区水土流失防治过程中尤其要注重土石混合堆积体的治理。

不同的降雨强度代表着不同降雨侵蚀营力,因此,分析次降雨土壤剥蚀率与雨强的关系对于矿区进行水土流失预测具有重要的现实指导意义。分析可知,弃土体、沙多石少弃渣体、沙少石多弃渣体的 D_r 与雨强 I 之间均呈显著地线性关系,其相关系数分别为 0.929 ($p=0.05$), 0.963 ($p=0.01$) 和 0.980 ($p=0.01$)。

表 2 弃土弃渣体平均土壤剥蚀率随雨强的变化

雨强/ (mm·min ⁻¹)	次降雨平均土壤剥蚀率/(g·m ⁻² ·s ⁻¹)		
	弃土体	沙多石少弃渣体	沙少石多弃渣体
1.0	3.89	7.94	0.02
1.5	5.19	14.33	0.57
2.0	7.05	14.40	1.09
2.5	7.37	17.83	1.54
3.0	12.76	21.85	2.72

2.2 弃土弃渣体水动力学特性

2.2.1 雷诺数 R_e 雷诺数 R_e (Reynolds number) 是一种可用来表征流体流动情况的无量纲数,从力学上讲是惯性力与黏性力之比,可以用来判定水流的流态。当 $R_e < 500$, 水流为层流,当 $R_e > 2000$, 水流为紊流,考虑到含沙量对水流运动黏滞性的影响,雷诺数计算式为^[14]:

$$R_e = \frac{VR}{\nu}$$

式中: V ——平均流速(m/s); R ——水力半径(m), $R = A/L$; A ——过水断面; L ——湿周; ν ——含沙水流的运动黏滞系数(m²/s), 其中,

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$$

式中: t ——水温(°C)。

图 1 分别描绘了不同下垫面在不同雨强下的雷诺数随降雨时间的变化过程。从图 1 可以看出,弃土弃渣体的 R_e 总体上随着雨强增大呈递增趋势,随降雨历时呈现先增大后稳定的趋势。各下垫面 R_e 在雨强为 1.0 mm/min 时维持在某一个常数上下小范围波动,可认为此时的水流大部分处于层流状态。而当雨强达到 3.0 mm/min 时, R_e 随降雨历时在大范围内起伏波动,处于过渡流与紊流不断交换的状态。而在 1.5, 2.0, 2.5 mm/min 雨强下, R_e 随产流时间的持续总体上呈先波动后保持相对稳定的状态。由于在产流初始,坡面上有较多的可蚀性颗粒,水流的剥蚀能力与下垫面的抗蚀能力处于非平衡状态,造成水流不稳定,进而导致水流流速的不断变化,使得 R_e 不断波动;而当产流开始后 6 min 时下垫面达到相对稳定,此时的水流剥蚀能力与下垫面的抗蚀能力相当,水流处于较平稳状态, R_e 的变化也较小。经计算,3 种不同下垫面的平均雷诺数的大小顺序为:沙多石少弃渣体 > 沙少石多弃渣体 > 弃土体。

2.2.2 弗劳德数 F_r 流体力学中弗劳德数表征流体惯性力和重力相对大小的一个无量纲参数,记为 F_r ,它反映了过水断面上水流具有的动能和势能的对比关系。按照清水明渠水流的标准,当 $F_r < 1$ 时,水流为缓流;当 $F_r > 1$ 时,水流为急流,其计算公式为^[9]:

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gl}}$$

式中: u ——水流的平均流速(m/s); g ——重力加速度(m/s²); l ——断面平均径流深(m)。

图 2 分别为弃土弃渣体在不同降雨强度条件下的 F_r 随降雨历时的变化。由图 2 可知,3 种不同下垫

面的 F_r 随雨强的变化不显著,但随产流历时的变化总体可以分为两个阶段:产流 0~12 min 内 F_r 随降雨历时上下波动;产流 12 min 后 F_r 在某一常数值附近上下小幅度波动,其中弃土体和沙少石多弃渣体的 F_r 在 0.50 左右,而沙多石少弃渣体的 F_r 在 0.60 左右。造成 3 种下垫面 F_r 的这种变化的主要原因是下垫面组成的不一致性,即土石比的不一致性。在产流初期,由于径流对表土进行不断地冲刷、剥离、搬运、沉

积,导致了水流的不稳定,在后期由于下垫面的抗蚀能力与水流的侵蚀能力达到平衡状态,水流进而趋于稳定。经分析,在整个降雨过程中,3 种下垫面 85% 以上 $F_r < 1.0$,即水流处于缓流状态。计算可知,3 种不同下垫面的 F_r 的大小顺序为:沙多石少弃渣体 > 弃土体 > 沙少石多弃渣体。由此可知,当下垫面中的砾石含量达到一定值时,有利于减缓坡面水流的运动速度,进而降低水土流失量。

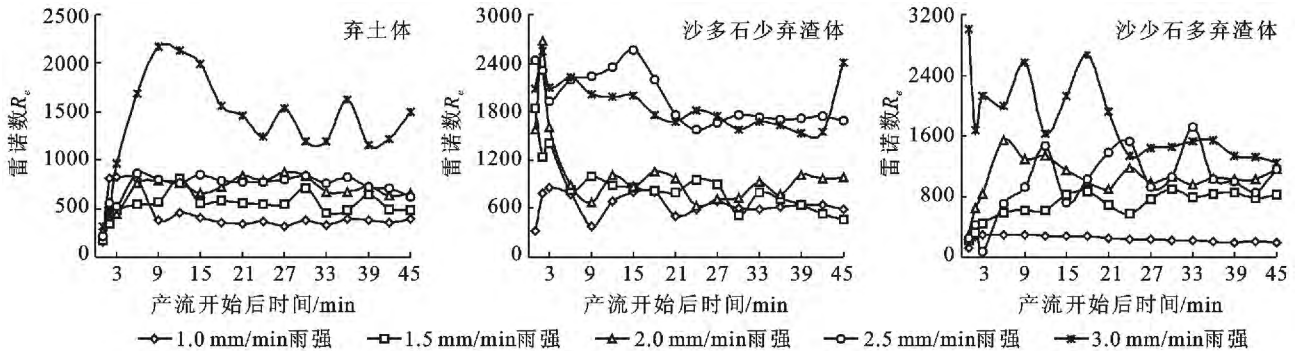


图 1 不同下垫面(弃土弃渣体)雷诺数 R_e 随时间的变化

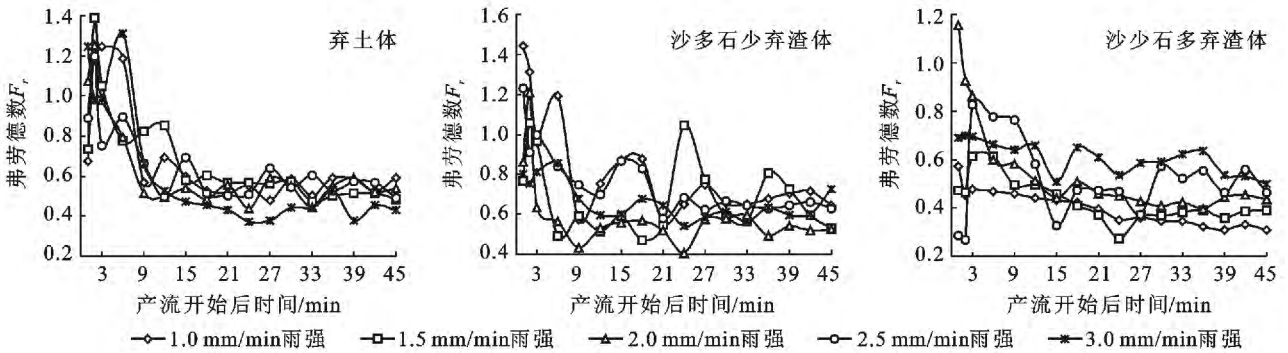


图 2 不同下垫面(弃土弃渣体)弗劳德数 F_r 随时间的变化

2.2.3 阻力系数 f Darcy—Weisbach 阻力系数是径流向下运动过程中受到的来自水土界面的阻滞水流运动力的总称。其表达式为^[15]:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2}$$

式中: V ——断面平均流速; J ——水力能坡, 计算式为:

$$J = \frac{l \sin \theta - \frac{V^2}{2g}}{l}$$

图 3 分别为弃土弃渣体在不同降雨强度下的阻力系数 f 随降雨历时的变化过程。由图 3 可以看出, 3 种下垫面的阻力系数随着降雨历时呈递增趋势, 而随雨强的变化不显著。从计算公式中可以看出, f 主要受到水流流速的影响。分析图 3 可知, 沙多石少弃渣体下垫面的 f 随降雨历时的波动情况较弃土体和

沙少石多弃渣体大, 主要是由于弃土体中砂砾含量少, 土粒之间的黏结性较强, 流速在整个降雨过程中的变化趋势较为平缓; 而沙少石多弃渣体中由于含有大量的砾石, 当砾石之间的可蚀性颗粒被冲走后, 形成一个稳定的固相骨架, 有利于坡面的稳定, 而砾石存在改变了水流的流速, 但水流流动速度较均匀, 导致了流速在降雨过程中的变化不大, 进而使得 f 在侵蚀过程中变化较平缓。经计算, 平均阻力系数 f 大小顺序为: 沙少石多弃渣体 > 弃土体 > 沙多石少弃渣体。

2.3 弃土弃渣体土壤剥蚀率与水流剪切力、水流功率关系

为了更加明确弃土弃渣体土壤侵蚀的力学性质, 对弃土弃渣体的平均土壤剥蚀率与水流剪切力及水流功率关系进行相关分析。其中, 水流剪切力 τ 为沿着坡面梯度方向运动的水流在其运动方向上产生的

一个作用力^[13], 计算公式为^[16]:

$$\tau = \rho g R J = r R J$$

式中: r ——水的容重, $r = \rho g$, 水流密度 ρ 取平均含沙量时的密度。

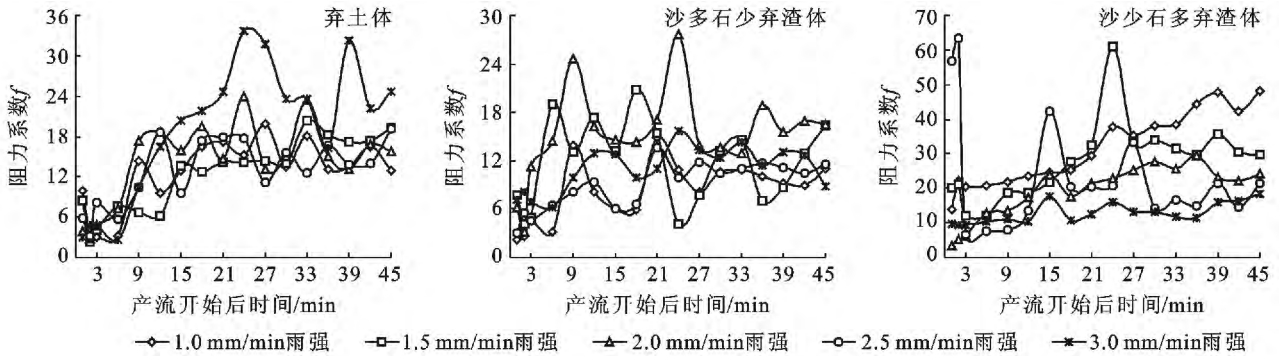


图 3 不同下垫面(弃土弃渣体)阻力系数 f 随时间的变化

水流功率 P 表征了一定高度的水体顺坡流动时具有的势能。Bagnold^[17] 提出了水流功率的概念, 即作用于单位面积的水流所消耗的功率, 表达式为:

$$\tau = rqs = rhVs = \tau V$$

式中: q ——单宽流量(m^3); h ——水深(m)。

2.3.1 平均土壤剥蚀率与水流剪切力关系 图 4 反映了 3 种不同下垫面次降雨平均土壤剥蚀率 D_r 与平均水流剪切力 τ 之间关系。从图 4 可以看出, 不同下垫面之间的平均土壤剥蚀率 D_r 随平均水流剪切力的增大整体呈递增趋势。计算可知, 各下垫面的 D_r 和 τ 均表现为: 沙多石少弃渣体 > 弃土体 > 沙少石多弃渣体。可以通过计算水流剪切力 τ 进而求得次降雨的土壤剥蚀率 D_r 。经分析, 弃土体、沙多石少弃渣体和沙少石多弃渣体的次降雨的平均水流剪切力 τ 与平均土壤剥蚀率 D_r 之间呈显著线性关系, 相关系数分别为 0.995 ($p=0.01$), 0.914 ($p=0.05$) 和 0.955 ($p=0.05$)。

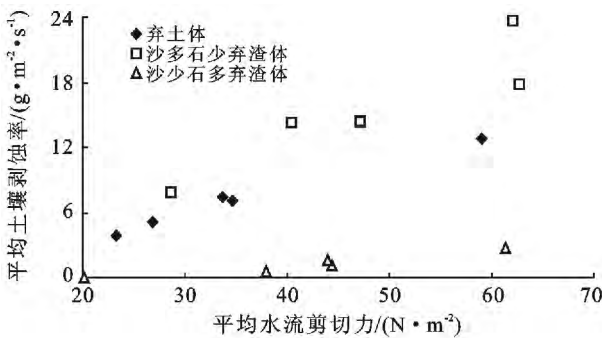


图 4 平均土壤剥蚀率 D_r 与水流剪切力 τ 的关系

2.3.2 平均土壤剥蚀率与水流功率关系 图 5 反映了 3 种不同下垫面的平均土壤剥蚀率 D_r 随水流功率 P 变化规律。从图 5 可以看出, 弃土体和沙少石多弃渣体的平均土壤剥蚀率 D_r 随着水流功率的增大呈显

著地递增趋势, 且变化范围较沙多石少弃渣体都较小。主要是由于沙多石少弃渣体中含有一定含量的砾石, 砾石的存在破坏了原有土壤结构, 导致土壤的抗蚀能力降低, 在径流的冲刷作用下产生较大的土壤侵蚀量, 同时由于沙多石少弃渣体坡面径流平均流速也较弃土体和沙少石多弃渣体大, 进而使得沙多石少弃渣体的平均水流功率 P 最大。计算可知, 3 种不同下垫面的次降雨平均水流功率 P 的大小顺序为: 沙多石少弃渣体 > 弃土体 > 沙少石多弃渣体。3 种下垫面次降雨平均土壤剥蚀率 D_r 均可用平均水流功率 P 描述。经分析, 弃土体、沙多石少弃渣体和沙少石多弃渣体的次降雨平均土壤剥蚀率 D_r 与水流功率 P 之间呈显著地线性关系, 相关系数分别为 0.992 ($p=0.01$), 0.912 ($p=0.05$) 和 0.973 ($p=0.01$)。

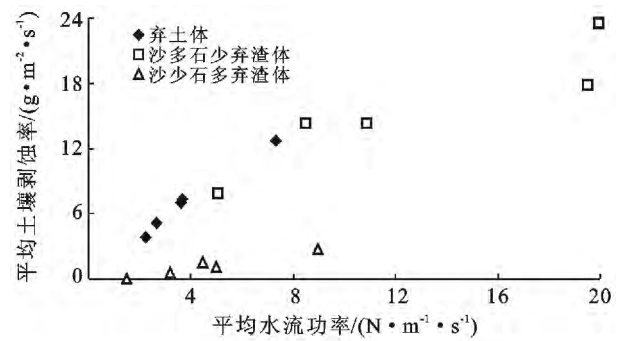


图 5 平均土壤剥蚀率 D_r 与水流功率 P 的关系

3 结论

(1) 弃土弃渣体的土壤剥蚀率 D_r 随雨强增大显著递增, 3 种下垫面土壤剥蚀率 D_r 的大小顺序为: 沙多石少弃渣体 > 弃土体 > 沙少石多弃渣体, 且各下垫面 D_r 值与雨强 I 之间呈显著线性关系。因此, 在进行矿区水土流失治理过程中, 尤其要注意对含有一定

砾石含量的弃渣体采用水土保持措施来减轻矿区严重的水土流失现状。

(2) 分析弃土弃渣体的 3 个水动力学特性参数 (R_r, F_r, f) 可知, 弃土弃渣体的 R_r 总体上随着雨强增大呈递增趋势, 随降雨历时呈现先增大后稳定的趋势, 3 种不同下垫面的平均雷诺数的大小顺序为: 沙多石少弃渣体 > 沙少石多弃渣体 > 弃土体; 3 种不同下垫面的 F_r 随雨强的变化不显著, 但随产流开始后的变化总体可以分为两个阶段: 产流 0~12 min 内 F_r 随降雨历时上下波动; 产流 12 min 后 F_r 在某一常数值附近上下小幅度波动; 阻力系数 f 随着降雨历时呈递增趋势, 而随雨强的变化不显著, 平均阻力系数 f 大小顺序为: 沙少石多弃渣体 > 弃土体 > 沙多石少弃渣体。

(3) 次降雨过程中, 3 种不同下垫面的平均土壤剥蚀率 D_r 随着平均水流剪切力 和水流功率 P 均呈线性递增关系。

[参 考 文 献]

- [1] 王文龙, 李占斌, 张平仓. 神府东胜煤田开发中诱发的环境灾害问题研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 34-38.
- [2] 张发旺, 赵红梅, 宋亚新, 等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 521-527.
- [3] 武强, 安永会, 刘文岗, 等. 神府东胜矿区水土环境问题及其调控技术[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(3): 54-57.
- [4] 张胜利, 时明立, 张利铭. 神府东胜煤田开发对侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 68-75.
- [5] 李强, 李占斌, 鲁克新. 神府东胜矿区不同下垫面产流产沙试验研究[J]. 水土保持研究, 2005, 15(3): 1-3.
- [6] 罗婷, 王文龙, 李宏伟, 等. 神府东胜煤田不同下垫面侵蚀特征野外试验[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 52-57.
- [7] 王文龙, 李占斌, 李鹏. 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] 王玲玲, 刘兰玉, 左仲国. 开发建设项目弃土弃渣水土流失调查分析[J]. 水力发电, 2009, 35(1): 1-3.
- [9] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 黄土高原坡沟系统径流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 19-24.
- [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] 王贞, 王文龙, 金剑, 等. 神东煤田扰动地面与原地面产流产沙及水动力学参数对比[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 69-74.
- [12] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 117-129.
- [13] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓, 等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 22-26.
- [14] 沙际德, 白清俊. 黏性土坡面细沟流的水力特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2001(6): 39-43.
- [15] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. Laboratory study of rill hydraulics (II): Shear stress relationships [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 797-804.
- [16] 王文龙, 雷阿林, 李占斌. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471-475.
- [17] Bagnold R. An approach to the Sediment Transport Problem from General Physics[M]. Washington: United States Government Printing Office, 1966.