

神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响*

郭明明¹ 王文龙^{1,2†} 李建明¹ 黄鹏飞³ 王贞⁴ 罗婷⁵ 李宏伟⁶

(1 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)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 江西省水土保持科学研究院土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

(4 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

(5 杭州大地科技有限公司, 杭州 310000)

(6 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310014)

摘要 神府煤田在开发建设过程中造成的扰动地面、弃土体、弃渣体产生了严重的人为水土流失。采用野外人工模拟降雨试验方法,研究了土壤分形维数及降雨强度对未扰动地面、扰动地面、弃土体及弃渣体径流产沙的影响。结果表明,(1)弃土体、弃渣体随产流历时呈现突增—下降—稳定的过程,扰动地面和未扰动地面则经历上升—稳定的产流过程,各下垫面径流率均随着雨强的增大而增大。(2)各下垫面土壤颗粒分形维数的大小为 D_1 (弃渣体) $< D_2$ (弃土体) $< D_3$ (扰动地面) $< D_4$ (未扰动地面),次降雨径流量与降雨强度、分形维数分别呈显著的线性、幂函数关系,且 $D_1 \sim D_2$ 及 $D_3 \sim D_4$ 之间存在用以区分下垫面类型的临界分形维数值。(3)弃渣体侵蚀过程线呈先波动后稳定趋势,弃土体则呈多峰多谷特点,扰动地面和未扰动地面在 $1.0 \sim 2.5 \text{ mm min}^{-1}$ 雨强下侵蚀速率均先增大后逐渐稳定, 3.0 mm min^{-1} 时二者侵蚀速率则波动剧烈。四种下垫面平均侵蚀速率均随着雨强的增大而增大。(4)次降雨产沙量与降雨强度、分形维数均呈显著的幂函数关系。(5)径流量、产沙量与雨强和分形维数分别呈显著的线性、指数函数关系。分形维数对矿区土壤侵蚀模型的建立有重要的科学意义。

关键词 神府煤田;分形维数;降雨强度;径流率;侵蚀速率

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

近年来,随着煤炭资源需求不断增大,采矿活动通过对未扰动地面严重扰动及开挖堆弃活动产生了大量的弃土弃渣体,加剧了矿区生态环境的恶化,成为新增水土流失的重要策源地之一,日益受到社会各界广泛关注。野外调查发现,矿区水土流失与传统农地侵蚀有着特征极大的差异性,其侵蚀严重危害性显现出矿区生态治理的迫切性,因此成为学术界近年来研究的热点与难点之一。通过试验研究弃土弃渣体侵蚀规律,来指导矿区生态环境修复与治理,从而降低水土流失的程度。20 世纪 90 年代初期,矿区生产建设项目中形成的扰动地面、弃土体、弃渣体引起的严重水土流失已受到广泛关注,许多学者业已做了大量关于此类问题的定性定

量研究^[1-6]。Dong 等^[7]通过对高速公路堆积体模拟降雨试验表明,堆积体径流率与容重关系密切,不同雨强下坡度越大径流率越大。赵暄等^[8]实验研究表明,次降雨径流率呈现波动式增长,而侵蚀速率则呈现平缓、多峰 2 种变化类型。由于弃土弃渣体结构松散,在大雨强条件下极易形成泥石流^[9-11],刘菲和唐红梅^[10]选取沟床比降,弃渣体颗粒级配等 10 个因子对重庆库区工程弃渣泥石流稳定性条件进行分析,揭示了泥石流启动的机理。土壤颗粒组成是土壤最基本的物理属性之一,常被用来描述土壤质地状况和结构性质,虽然土壤颗粒在欧几里德几何中被认为是复杂的不规则体,但是从分形角度分析,它可以用非整数维数来描述其形状,分形维

* 国家自然科学基金项目(40771127)、水利部公益性行业专项(201201048, 201201047)、中国科学院西部行动计划(KZCX-XB3-13)项目资助

† 通讯作者, E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 郭明明(1991—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。研究方向为开发建设项目水土保持。E-mail: st_gmm@163.com

收稿日期: 2013-11-08; 收到修改稿日期: 2014-05-07

数是用来描述复杂形体不规则性的量度,反映不规则形体占有空间的有效性。分形理论在土壤科学方面的研究取得了一定的进展,Martínez-Mena 等^[12]和 Abbas 等^[13]认为土壤颗粒分形维数可以作为可蚀性差异的区分指标;而 Zhao 等^[14]研究发现团聚体的分形维数对土壤结构状况的反映优于颗粒分形维数,然而其应用大部分局限在地貌形态、土壤颗粒、结构、孔隙的分形特征及水分特性层面上^[15-18]。综上可知,关于矿区开发产生的各类工程弃土弃渣体的径流产沙特点与规律,已进行了大量的定性定量试验研究,一定程度上揭示了侵蚀过程及其机理。但在不同下垫面侵蚀特点的定量研究方面,在运用分形理论与方法研究下垫面因素对侵蚀特征与规律的影响还有待深入,尤其是对人为堆积的松散弃土弃渣体研究方面尚显空白。因此,本文将此理论引申到弃土弃渣体等的研究中,对弃土体、弃渣体、扰动地面、未扰动地面的下垫面运用分形维数进行表征,量化下垫面对侵蚀产沙规律的影响,建立径流产沙与分形维数的关系,以期揭示矿区土壤侵蚀机理及规律,为生产建设项目新增水土流失的预测及水土保持措施的合理配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

神府东胜矿区地处晋陕蒙三省交界处(N37°20′~40°16′,E108°36′~110°3′),是世界八大煤田之一,也是我国重要的煤碳供应基地,总面积 3.12×10^4 km²。属于典型干旱半干旱大陆季风性气候,年均气温 6.1~9.1℃,多年平均降雨量 325~460 mm,多集中于7—9月,且多以暴雨形式发生,年蒸发量 1 636~2 535 mm,气候条件尤为恶劣。典型黄土丘陵地貌,处于黄河中游风蚀水蚀交错区、黄河粗泥沙来源区、干旱半干旱生态环境脆弱带。地表组成物质复杂,结构松散,易风化,抗蚀能力差,土壤类型多为黄土及风沙土。植被生长发育较差,主要为温带半干旱植被,沙地植被占多数,且覆盖度低。由于其地表疏松、植被覆盖度小、位于暴雨中心,尤其是在人类采矿活动扰动下,夏季水蚀剧烈并占主导地位,春季以风蚀为主,风蚀水蚀交替进行,成为水土流失最为严重的地区之一。

1.2 试验布设及方法

试验选取在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,首先对本地区进行

野外实地调查,主要调查内容为采矿形成的各种下垫面及其性质(坡度、颗粒组成等)的表征值的变化范围,为试验控制因子的选取提供依据。根据调查结果选取扰动地面、弃土体、弃渣体作为研究区下垫面代表,并以未扰动地面作为对比,其中未扰动地面即为矿区周围未经开矿、耕种等未产生人为扰动的、原始的撂荒地。扰动地面是指各类人为开发建设活动及挖方对原地面土壤造成一定的扰动和破损,主要是挖方造成对土体的表层剥离与松动,与未扰动地面相比其孔隙度较大,结构疏松。弃土体、弃渣体是指煤矿开采、采石、挖损地表过程中形成的大量的弃土、弃渣、弃石等废弃物及其混合物的大量堆砌,其颗粒组成主要以砾石、碎石、煤矸石、风沙土、黄土为主,物质组成复杂,颗粒粒径的差异较大,含石量较多,孔隙度较大,疏松多孔易蚀。径流小区为 3 m × 1 m,小区下端设钢制三角集水槽;未扰动与扰动地面的坡度为 18°,为当地自然坡度平均值;弃土体、弃渣体坡度为自然休止角,多为 40°左右,本文选定 40°。雨强根据当地多年自然降雨频率气象资料分析,根据 20 年一遇的频率标准,当地发生侵蚀性降雨的雨强在 1.0~3.0 mm min⁻¹之间,依次选择雨强为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm min⁻¹五个级别。试验装置为野外人工临时搭建,在小区周围利用 12 根 6 m 长、20 根 3 m 长、直径为 6 cm 钢管搭建降雨棚,四周用彩条布包围防止风等因素对试验的干扰,搭建高度为 3 m,小区正上方布置一排下喷式降雨器,使用潜水泵抽水至小区上方处 2 m³ 储水桶,采用 60 m 扬程水泵抽取储水桶的水,通过阀门控制雨强,控制喷头调节降雨均匀度使之接近天然降雨。试验前率定雨强,方法与文献[19]一致,即在小区四个角点均匀摆放直径为 20 cm 的盛雨器,用雨量筒读取降雨量,换算为降雨强度,率定雨强与设计雨强误差在 3% 以内,均匀系数采用克里斯琴森提出的喷灌均匀系数(CU)进行计算^[20],要求均匀度在 85% 以上。雨强率定符合要求后,快速掀起遮雨布,同时秒表计时,记录产流时间,产流后用 1 000 ml 量筒接泥沙样,前 3 min 内,每 1 min 接 1 次泥沙样,3 min 后每 3 min 接 1 次泥沙样,每次接样后读取量筒泥沙体积 V 及接样时间 T ,设计产流历时 45 min。并分析各下垫面土壤颗粒组成,首先对 >0.25 mm 颗粒进行干筛,取孔径为 0.25、0.5、1、2、5、10 mm 六个土筛,对各筛中样品称重并记录,留在最下边筛中土壤样为 <0.25 mm,在实验室采用吸管法进行测量,测量结果详见表 1。

表 1 土壤机械组成

Table 1 Mechanical composition of the soils in the experiment (%)

下垫面 Underlying surface	<0.002 mm	0.002 ~ 0.005 mm	0.005 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.025 mm	0.025 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.1 mm	0.1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 1 mm	1 ~2 mm	2 ~5 mm	5 ~10 mm	10 ~20 mm
弃渣体 Pile of waste slag	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
弃土体 Pile of translocated soil	0.15	0.42	0.48	0.63	0.9	13.42	28.6	35.28	7.67	5.34	2.96	2.52	1.63
扰动地面 Disturbed land	1.38	1.53	5.8	7.28	7.7	18.88	26.56	23.21	5.53	2.12	0	0	0
未扰动地面 Undisturbed land	1.35	3.46	4.19	6.89	8.09	21.65	26.56	23.21	3.23	0.56	0.45	0.21	0.15

1.3 数据分析

分形维数采用杨培玲^[21]提出的用粒径的质量分布描述土壤分形模型:

$$\frac{W(\delta > d_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

两边取对数

$$\lg \frac{W(\delta < d_i)}{W_0} = (3 - D) \lg \left(\frac{d_i}{d_{max}}\right) \quad (2)$$

式中, $W(\delta > d_i)$ 表示大于 d_i 累积土粒质量, W_0 为各粒级质量之和, d_i 为筛分粒径范围 $[d_j, d_{j+1}]$ 平均值, d_{max} 为最大粒级平均直径, 即在某个粒径级 $[d_j, d_{j+1}]$, $d_i = 1/2(d_j + d_{j+1})$ 。点绘 $\lg \frac{W(\delta < d_i)}{W_0}$ 与

$\lg \left(\frac{d_i}{d_{max}}\right)$ 关系, 运用线性方程拟合, 在置信度为 95%

时得到直线方程的相关系数分别为 0.945、0.872、0.892、0.807, 直线的斜率为 k_i , 分别为 0.836、0.744、0.622、0.434, 则分形维数 $D_i = 3 - k_i$, 各下垫面颗粒分形维数弃渣体 (D_1)、弃土体 (D_2)、扰动地面 (D_3)、未扰动地面 (D_4) 依次为 2.164、2.256、2.378、2.566。

2 结果

2.1 降雨强度对不同下垫面径流过程的影响

降雨是径流形成的主要因素, 降雨强度影响着

径流的强弱, 而径流率是表征次降雨过程中径流随时间变化的最直观变量。点绘不同下垫面不同坡度及雨强下的实验数据, 如图 1 所示。径流率变化特征如下: 弃土体、弃渣体均随降雨历时呈现突增—下降—稳定的过程。突增是由于产流开始时坡面细小颗粒被冲刷后, 堵塞表面空隙短时间内入渗减小的缘故; 下降是由于细颗粒被搬运后结构松散的下垫面入渗能力增大所致; 稳定是由于径流挟沙能力已对所能搬运颗粒完成了侵蚀过程, 径流在坡面形成稳定的流动路径。扰动地面和未扰动地面则经历上升—稳定, 稳定中有波动的产流过程。上升原因与弃土弃渣体相似; 稳定是由于随着降雨的进行土壤入渗率达到了稳定, 故产流过程线平缓下来。

从降雨强度分析, 各下垫面径流率均随着雨强的增大而增大。对于弃土体、弃渣体, 雨强越大突增—下降的幅度越大, 由于降雨补充量增大, 相对于土壤入渗能力其径流量必然增大。对于弃土体、扰动地面、未扰动地面在后期稳定的过程中, 雨强越大波动越剧烈, 这是由于雨强的增大对水流的紊动性起着助推作用, 并且雨强增大径流冲刷力大于土壤抗蚀性进而发生沟蚀, 同时由于流路的变化导致波动的存在。

从下垫面性质分析, 各下垫面颗粒的分形维数为弃渣体 < 弃土体 < 扰动地面 < 未扰动地面, 这与

张世熔等^[16]所研究的黏粒含量越高分形维数越高,粉粒对其影响其次,砂粒含量越高分形维数越低结果相一致。弃渣体很早进入稳定期是由于其本身的土壤结构性差,土壤易蚀性指数高,故而水流很快破坏渣体,对可蚀性颗粒大量侵蚀搬运,从而形成稳定流路,在降雨 30~35 min 时径流率波动过程是由于某部位较大渣体失衡所导致。对于弃

土体、扰动及未扰动地面由于其细颗粒含量相对较高,颗粒的比表面积大,加大颗粒之间的作用力以及对水分的吸附力,所以径流率随着颗粒分形维数的增大而减小。此外,虽然这三种下垫面结构相对稳定,但经过人为扰动及堆积导致其各处的抗蚀性有差异,这才使得四种下垫面后期径流稳定性表现出不同。

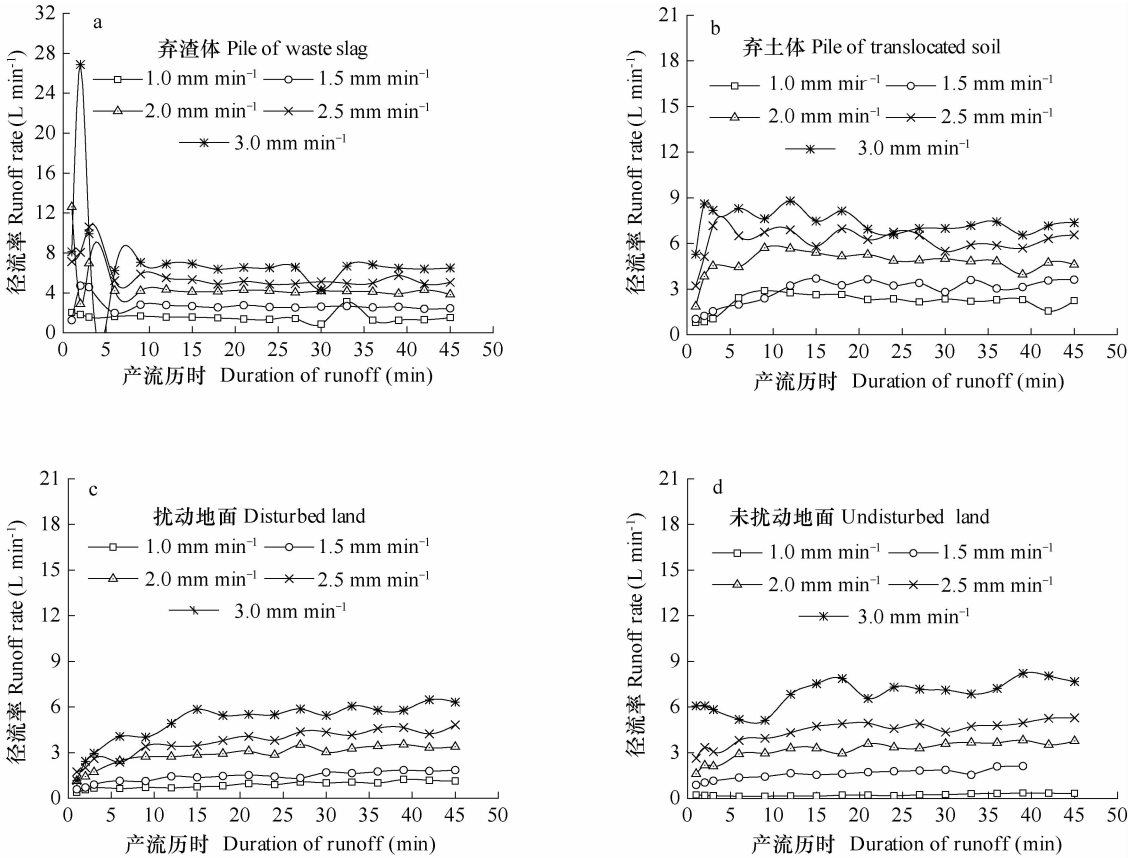


图 1 不同降雨强度下各下垫面径流率随产流历时的变化

Fig. 1 Variation of runoff rate on underlying surfaces with duration of runoff under the different rainfall intensities

2.2 径流量与降雨强度及下垫面的关系

点绘各下垫面次降雨径流量—雨强及各雨强下次降雨径流量—分形维数关系如图 2 所示,并利用 Origin8.0 对二者进行方程拟合,结果表明,各下垫面次降雨径流量与降雨强度呈现显著的线性关系,其关系可表示为: $M_w = a \cdot P_i - b, N = 5, R^2 = 0.98 \sim 0.99$ 。次降雨径流量与土壤颗粒分形维数呈现显著的三次幂函数关系,其关系为: $M_w = p \cdot D_i^3 - q \cdot D_i^2 + m \cdot D_i - n, N = 4, R^2 = 0.99$ 。式中 M_w 为次降雨径流量 (L), D_i 为分形维数, P_i 为降雨强度 (mm min^{-1}), a, b, p, q, m, n 为经验系数。由图 2b 可知,径流量开始随着分形维数的增加出现上升—下降—上升的趋势,对径流量与分形维数关系方程

进行极值分析发现 5 个雨强下分形维数极值点分别为 $D_1 < 2.219, 2.229, 2.226, 2.230, 2.240 < D_2, D_3 < 2.458, 2.475, 2.477, 2.481, 2.504 < D_4$, 两组数据平均值分别为 2.229、2.479。颗粒组成反映下垫面土壤结构状况,因此这两组分形维数极值点平均值可作为区分弃渣体与弃土体、扰动地面与未扰动地面下垫面类型的指标。

分析径流量与降雨强度和分形维数的关系发现,在置信度 95% 时径流量与二者呈显著的线性关系, F 检验值为 82.28。其式如下:

$$M_w = -147.43D_i + 123.46P_i + 268.96 \quad (3)$$

$N = 20, R^2 = 0.95$

从式(3)可知,降雨强度和下垫面的联合对径

流量的影响非常显著,这与传统分析雨强对径流量影响而建立的关系相比,更为深入地揭示了下垫面对径流量的影响。

2.3 降雨强度对不同下垫面产沙过程的影响

如图 3 所示,弃渣体在产流历时前 6 min 侵蚀过程线剧烈波动并在前 3 min 出现次降雨侵蚀峰值,6 min 后稳定下来,3.0 mm min⁻¹ 时在第 9 和 30 分钟时又出现 2 次波峰,整体上呈现起伏—稳定的

趋势;弃土体侵蚀过程线随产流历时一直处于波动状态,属多峰多谷型;扰动地面和未扰动地面雨强在 1.0~2.5 mm min⁻¹ 时侵蚀速率均出现增大后逐渐稳定的趋势,而 3.0 mm min⁻¹ 时的扰动地面先增大,至 6 min 后出现剧烈波动,30 min 后稳定下来,3.0 mm min⁻¹ 时的未扰动地面侵蚀速率先下降,至 9 min 后持续剧烈波动。

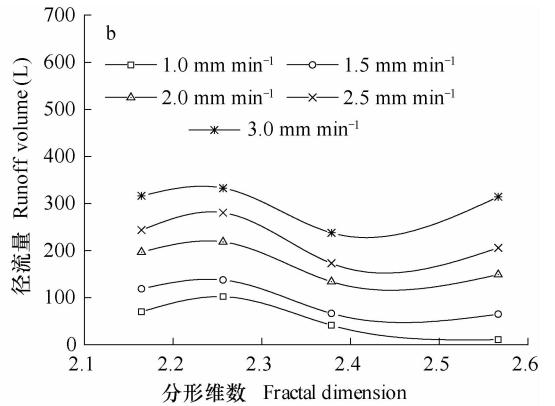
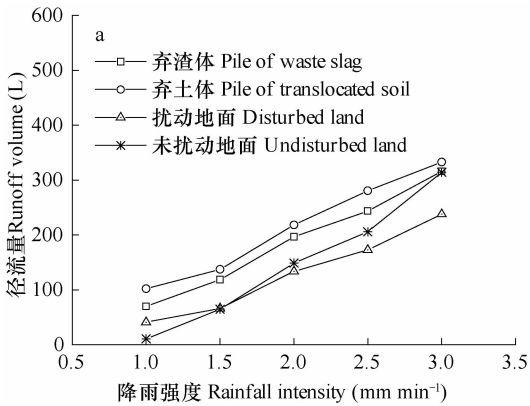


图 2 各下垫面径流量随降雨强度及不同降雨强度下径流量随分形维数的变化

Fig. 2 Variation of runoff volume with rainfall intensity and fractal dimension in different underlying surfaces and rainfall intensities, respectively

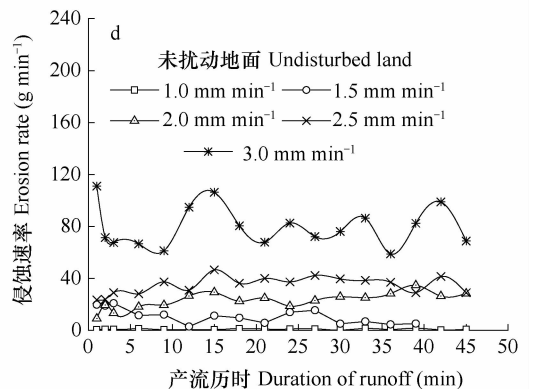
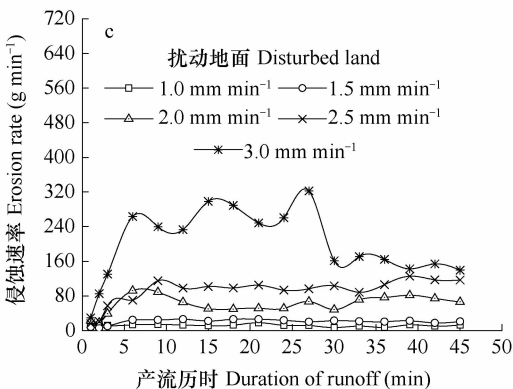
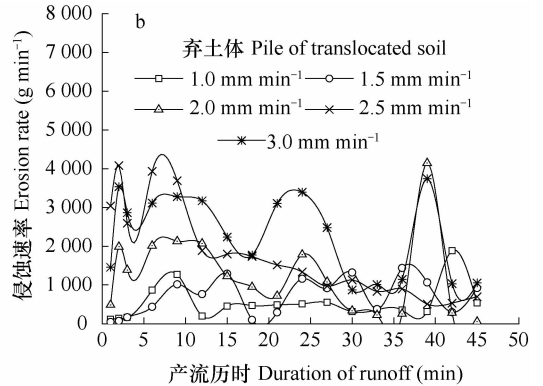
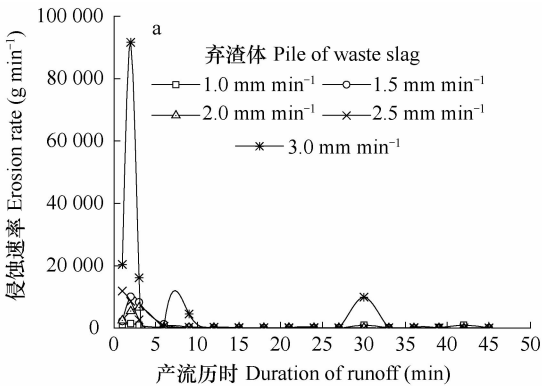


图 3 不同降雨强度下各下垫面侵蚀速率随产流历时的变化

Fig. 3 Variation of erosion rate on different underlying surfaces with duration of runoff under the different rainfall intensities

从降雨角度分析,弃渣体、扰动地面、未扰动地面侵蚀速率均随着雨强的增大而增大,虽然弃土体侵蚀过程较为剧烈,但是从次降雨平均侵蚀速率看,弃土体侵蚀速率亦随雨强增大而增大。对于弃渣体在 0~6 min 期间,雨强越大其波动幅度越大,原因即弃渣体无土壤结构,颗粒间粘结力差,易被水流侵蚀搬运,一旦沟蚀堵塞的某处被聚集的径流冲垮后,渣体失稳便大量崩塌下泻,故而出现侵蚀峰值,6 min 后稳定是由于水流所能搬运颗粒已所剩无几,侵蚀沟流路形成,侵蚀平缓下来。各雨强下的弃土体整体呈现反复上升—下降的多峰多谷现象,出现大幅度波动的原因因为弃土体经过人为扰动破坏后结构松散、抗蚀性差,首个峰值是由于雨滴的击溅和坡面的漫流带走表面的细颗粒所致,但是弃土体本身孔隙大、入渗能力强,所以峰值后过程线出现下降趋势,当土壤入渗达到饱和后,坡面径流的剪切力大于土壤的抗蚀性时即出现大范围沟蚀现象,这使整个坡面土体的稳定性失衡,导致了中、后期更为频繁的波动。对于扰动地面和未扰动地面在 1.0~2.5 mm min⁻¹ 雨强时均表现为先增大后稳定的状态,这主要是由于二者下垫面结构性好,稳定性高,产流后径流先对坡面细颗粒击溅侵蚀搬运,而后土壤抗蚀力与径流剪切力相互作用并维持在相似水平,使得侵蚀速率也在一稳定水平上下微波动;当雨强在 3.0 mm min⁻¹ 时,扰动地面和未扰动地面在 0~6 min 时侵蚀速率分别为上升和下降,这是由于未扰动地面初始入渗率小于扰动地面使得其径流挟沙能力较扰动地面高的缘故;6~30 min 的扰动地面及 6 min 后的未扰动地面侵蚀过程线波动是由于径流侵蚀力的增强,水流首先选择最小阻力路径并对坡面薄弱处进行侵蚀^[22],水流汇

集从而导致细沟的出现,以此“恶性循环”更多泥沙被搬运,并伴随因沟头溯源及沟宽、沟深的发育,崩塌产生泥沙源的补充,使得微地形坡度变缓,当崩塌泥沙被水流搬运后其上部又形成临空面,开始下个周期的重力侵蚀^[23],这就呈现出多峰多谷的侵蚀现象。

从下垫面性质分析,下垫面的差异是导致侵蚀过程和结果不同的根本原因,试验中发现弃渣体起始含沙量巨大,在坡面形成稠浓的固液二相体,具有稀性泥石流现象,而随着分形维数的增大,侵蚀速率越来越稳定,主要由于分形维数越大,其黏粒含量越高,土壤结构越稳定,侵蚀趋于缓慢。分析发现,弃土体、弃渣体、扰动地面的各次降雨平均侵蚀速率分别是未扰动地面的 13 倍~572 倍、1.8 倍~121.2 倍、2.6 倍~53.6 倍、2.6 倍~52.8 倍、2.5 倍~107.3 倍。这也说明生产建设活动造成的扰动地面、弃土体、弃渣体水土流失程度是原来的几倍乃至上百倍,大大加剧了侵蚀强度。

2.4 产沙量与降雨强度及下垫面的关系

根据试验数据绘制次降雨产沙量与降雨强度、分形维数变化关系如图 4 所示。运用 Origin8.0 进行相关分析并建立次降雨产沙量—雨强、分形维数关系。结果表明,次降雨产沙量与降雨强度、分形维数均呈幂函数关系。产沙量与雨强关系式为: $M_s = a \cdot (1 + P_i)^b$, $N = 5, R^2 = 0.93 \sim 0.99$ 。产沙量与分形维数关系为: $M_s = c \cdot D_i^d$, $N = 4, R^2 = 0.75 \sim 0.94$ 。式中 M_s 为产沙量 (kg), D_i 为土壤分形维数, P_i 为降雨强度 (mm min⁻¹), a, b, c, d 为经验系数。结合产沙量—分形维数变化图及拟合方程发现,除 3.0 mm min⁻¹ 持续递减外其余雨强下的趋势线均是先增大后减小,而拟合方程则是递减函数,出现这

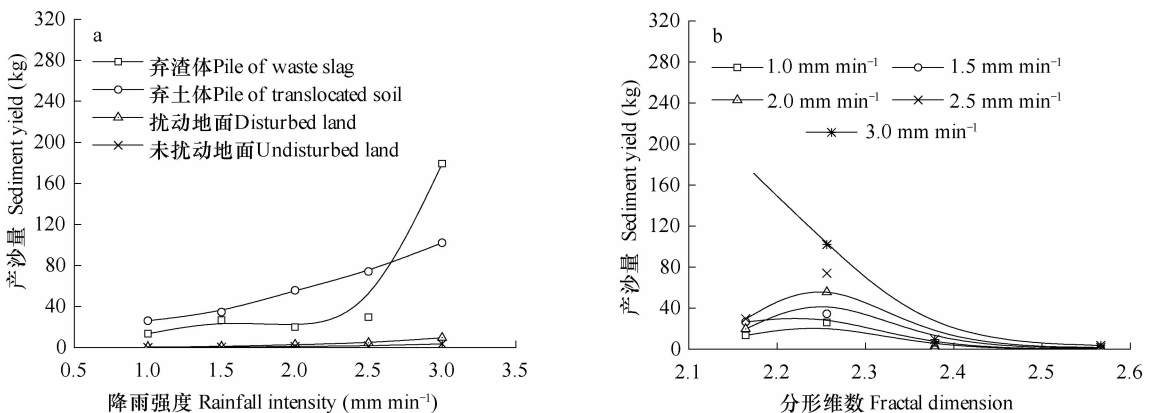


图 4 不同下垫面产沙量随降雨强度及不同降雨强度下产沙量随分形维数的变化

Fig. 4 Variation of sediment yield with rainfall intensity and fractal dimension in different underlying surfaces and rainfall intensities, respectively

种现象的原因可能是由于弃渣体中可供泥沙量小于此次降雨侵蚀能力所具有的搬运能力, 3.0 mm min^{-1} 雨强时弃渣体产沙量最大是由于径流侵蚀力大, 搬运了更大更多的颗粒物。

分析产沙量与降雨强度和分形维数的关系发现, 在置信度 95% 时产沙量与二者呈显著的指数函数关系, F 检验值为 46.07。其式如下:

$$\ln M_i = -11.32D_i + 1.32P_i + 25.83$$

$$N = 20, R^2 = 0.84 \quad (4)$$

从式(4)可知, 不仅降雨强度和下垫面分别对径流量有显著的影响而且二者共同对其影响也非常显著, 在建立产沙模型时引入下垫面因子是值得被考虑的。

3 讨论

对于径流率, 各下垫面径流率均随着雨强的增大而增大, 这与已有的大多研究一致^[24], 弃土体、弃渣体径流率变化呈现突增—下降—稳定的过程, 与赵暄等^[8]室内模拟降雨研究弃土弃渣体径流率动态变化整体呈波动式增长趋势的结果略有差异, 这是因为本研究中弃土弃渣体坡度较大(40°), 且下垫面大颗粒较多, 渣体尤为松散, 渣体中水流流动时阻力小的同时渣体不稳定崩塌也造成对孔隙的堵塞, 所以本文中弃土弃渣体在降雨初期径流率表现突增—下降的现象。

各下垫面颗粒的分形维数为弃渣体 < 弃土体 < 扰动地面 < 未扰动地面, 结合表 1 中砂粒、粉粒、黏粒所占比例与分形维数大小关系可知, 其结果与张世熔等^[16]、王国梁等^[26]研究结果一致。径流量与分形维数呈极显著三次幂函数关系。对模拟方程求导获取极值发现, 弃渣体(D_1)与弃土体(D_2)、扰动地面(D_3)与未扰动地面(D_4)两两之间存在两个分形维数极值点 2.229、2.479。弃渣体实际上可认为不具备土壤各项物理化学性质; 弃土体和扰动地面则是经过人为破坏, 其结构和组成方面与自然成土过程形成的土壤不完全相同, 结构性指标优于弃渣体但差于未扰动的撂荒地; 撂荒地则代表着自然成土过程形成的土壤, 其结构性最好, 颗粒分形维数也最大。结合极值点猜测弃渣体与弃土体、扰动土壤与未扰动土壤之间存在着区分二者所属下垫面类别的指标值, 即代表土壤结构固有属性的分形维数^[26]。

弃土弃渣体侵蚀过程线呈多峰多谷特点; 扰动

地面和未扰动地面侵蚀速率相对平稳, 但是弃土体、弃渣体、扰动地面侵蚀速率是未扰动地面的数十倍至数百倍, 而赵暄等^[8]研究 33° 弃土弃渣体以锥状堆积时在相同雨强下其侵蚀速率与本研究相差 1~2 个数量级, 且其过程线也非常平稳, 马春艳等^[27]对 36° 弃土弃渣体进行放水冲刷研究, 结果表明侵蚀速率与放水时间呈递减对数关系, 说明弃土弃渣体的堆积方式、坡度及试验方法对侵蚀速率的影响显著。

本研究对 20 场降雨数据分析, 径流量与降雨强度、分形维数呈线性关系, 产沙量则可用指数函数预测, 关于分形维数在侵蚀模型中的应用还少有报道。目前研究成果可分为三个方面, 地貌分形(维数介于 1~2)与土壤侵蚀的关系^[28]、土壤颗粒的分形特征^[29-30]、及土壤颗粒分形(维数介于 2~3)与土壤抗蚀性关系^[31-34]。张凤宝和杨明义^[28]通过降雨试验研究坡面侵蚀过程, 分析发现细沟沟网分形维数与总产沙量和细沟产沙量均呈显著线性关系。Chen 和 Zhou^[32]研究结果表明, 六种土地利用方式下土壤颗粒体积分形维数与由 EPIC 和 NOMO 模型计算出的可蚀性呈负相关关系。朱冰冰等^[34]研究发现水稳性团粒结构的分形维数与土壤抗蚀性 K 值呈显著正相关, 并认为团粒结构分形维数可以作为土壤抗蚀性评价的指标之一。因此, 本研究认为分形维数对侵蚀模型的建立具有积极意义。

4 结论

神府煤田各下垫面土壤颗粒分形维数的大小为弃渣体 < 弃土体 < 扰动地面 < 未扰动地面, 四种下垫面的产流过程存在突增—下降—稳定和上升—稳定两种类型, 径流率均随着雨强的增大而增大, 随分形维数增大而减小, 且 $D_1 \sim D_2$ 及 $D_3 \sim D_4$ 之间存在临界分形维数值以区分下垫面类型。次降雨径流量与降雨强度、分形维数分别呈显著的线性、幂函数关系。各下垫面土壤侵蚀过程复杂, 主要有波动—稳定、多峰多谷、增大—稳定及持续波动四种类型, 侵蚀速率均随着雨强的增大而增大, 分形维数越大, 侵蚀过程越稳定。次降雨产沙量与降雨强度、分形维数均呈显著的幂函数关系。径流量、产沙量与雨强和分形维数分别呈显著的线性、指数函数关系。分形维数对矿区土壤侵蚀模型的建立有重要的科学意义。

参 考 文 献

- [1] 郭成久, 安晓奇, 武敏, 等. 弃土场侵蚀产沙模拟试验研究. 中国水土保持科学, 2010, 8(3): 29—32. Guo C J, An X Q, Wu M, et al. Simulation experiment of erosion and sediment yield of spoil ground (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(3): 29—32
- [2] 黄杰, 刘志双, 鲁艳妮, 等. 弃渣场岩土侵蚀研究进展. 亚热带水土保持, 2012, 24(2): 20—22, 33. Huang J, Liu Z S, Lu Y N, et al. Research progress of abandon slag field rock and soil erosion (In Chinese). Subtropical Soil and Water Conservation, 2012, 24(2): 20—22, 33
- [3] 陈奇伯, 黎建强, 王克勤, 等. 水电站弃渣场岩土侵蚀人工模拟降雨试验研究. 水土保持学报, 2008, 22(5): 1—4, 10. Chen Q B, Li J Q, Wang K Q, et al. Artificial rainfall research of rock and soil erosion on dumping pile in the hydropower station (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 1—4, 10
- [4] 彭旭东, 史冬梅, 江东, 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, Shi D M, Jiang D, et al. Experimental study on water runoff 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
- [5] 景峰, 张学培, 郭汉清, 等. 山西省葛铺煤矿弃土弃渣径流泥沙研究. 水土保持研究, 2007, 14(4): 61—64, 73. Jing F, Zhang X P, Guo H Q, et al. The study of runoff and sediment by artificial rainfall in Gepu Coal Mine of Shanxi Province (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(4): 61—64, 73
- [6] Bian Z F, Inyang H I, Daniels J L, et al. Environmental issues from coal mining and their solutions. Mining Science and Technology, 2010, 20(2): 215—223
- [7] Dong J Z, Zhang K L, Guo Z L. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study. Transportation Research Part D, 2011, 17(1): 8—14
- [8] 赵暄, 谢永生, 王允怡, 等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究. 水土保持学报, 2013, 27(3): 1—8, 76. Zhao X, Xie Y S, Wang Y Y, et al. Experimental study on soil erosion and sediment yield of spoilbank under simulated rainfall condition (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 1—8, 76
- [9] 吴永, 何思明, 裴向军, 等. 震后沟道泥石流启动条件——松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析. 岩土力学, 2012, 33(10): 3043—3050. Wu Y, He S M, Pei X J, et al. Analysis of condition of startup of gully debris flow after earthquake—The hydraulic mechanism of instability of loose deposits in rainfall (In Chinese). Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3043—3050
- [10] 刘菲, 唐红梅. 重庆库区工程弃渣泥石流形成机理. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 620—623, 640. Liu F, Tang H M. Formation mechanism of construction spoil debris flow in Chongqing reservoir (In Chinese). Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(4): 620—623, 640
- [11] 张永双, 金逸民, 吴树仁, 等. 人工弃渣诱发泥石流的动力学研究. 地球学报, 2005, 26(6): 571—576. Zhang Y S, Jin Y M, Wu S R, et al. Dynamics of debris flow caused by human waste-dump: A case study of the Huangjia valley in Badong County of the Three Gorges Region (In Chinese). Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(6): 571—576
- [12] Martínez-Mena M, Deeks L K, Williams A G. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility. Geoderma, 1999, 90(1): 87—98
- [13] Abbas A, Mohammad-Reza N, Hassan R, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. Journal of Hydrology, 2011, 400(3): 305—311
- [14] Zhao S W, Su J, Yang Y H, et al. A fractal method of estimating soil structure changes under different vegetations on Ziwuling Mountains of the Loess Plateau, China. Agricultural Sciences in China, 2006, 5(7): 530—538
- [15] 周银军, 陈立, 刘同宦. 分形理论在泥沙研究中的应用概述. 泥沙研究, 2012(2): 73—80. Zhou Y J, Chen L, Liu T H. Application of fractal theory to sediment research (In Chinese). Journal of Sediment Research, 2012(2): 73—80
- [16] 张世榕, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. 土壤学报, 2002, 39(2): 221—226. Zhang S R, Deng L J, Zhou Q, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 221—226
- [17] 李泳, 陈晓清, 胡凯衡, 等. 泥石流颗粒组成的分形特征. 地理学报, 2005, 60(3): 495—502. Li Y, Chen X Q, Hu K H, et al. Fractality of grain composition of debris flows (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2005, 60(3): 495—502
- [18] 郭飞, 徐绍辉, 刘建立. 土壤图像孔隙轮廓线分形特征及其应用. 农业工程学报, 2005, 21(7): 6—10. Guo F, Xu S H, Liu J L. Characteristics of pore profile fractal dimension of soil images and its application (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 6—10
- [19] 吴光艳, 祝振华, 成婧, 等. 人工模拟降雨特性对坡面产流产沙量的影响研究. 节水灌溉, 2011(6): 44—47. Wu G Y, Zhu Z H, Cheng J, et al. Runoff and sediment characteristics of slope under simulated rainfall (In Chinese). Journal of Water-saving Irrigation, 2011(6): 44—47
- [20] 倪含斌, 张丽萍, 张登荣. 模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2065—2071. Ni H B, Zhang L P, Zhang D R. Simulated rainfall experiments on soil and water erosion in different phases of resources exploitation in Shendong Mine Region (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(12): 2065—2071
- [21] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896—1899. Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Characterized by particle size distribution of the weight of the soil fractal (In Chinese). Chinese Science Bul-

- letin, 1993, 38(20): 1896—1899
- [22] 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). Transaction of the CSAE, 2013, 29(8): 145—153
- [23] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 27—34, 45. Xu J X. Erosion and sediment yield of hyperconcentrated flows on Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(1): 27—34, 45
- [24] 据彤军, 刘普灵, 徐学选, 等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究. 泥沙研究, 2007(4): 65—71. Ju T J, Liu P L, Xu X X, et al. Experimental study on runoff and sediment process in primary-lands in loess hilly regions under different rainfall conditions (In Chinese). Journal of Sediment Research, 2007(4): 65—71
- [25] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39(4): 490—497. Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 490—497
- [26] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. 土壤学报, 2005, 42(4): 545—550. Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545—550
- [27] 马春艳, 王占礼, 寇晓梅, 等. 工程建设弃土弃渣水土流失过程试验研究. 水土保持通报, 2009, 29(3): 78—82. Ma C Y, Wang Z L, Kou X M, et al. Experimental study of soil and water loss processes on waste soil and residue in project construction (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 78—82
- [28] 张风宝, 杨明义. 基于⁷Be 示踪和细沟沟网分形维数研究坡面土壤侵蚀. 核农学报, 2010, 24(5): 1032—1037. Zhang F B, Yang M Y. Plot-slope soil erosion using ⁷Be measurement and rill fractal dimension (In Chinese). Journal of Nuclear Agriculture Science, 2010, 24(5): 1032—1037
- [29] Xie X J, Wei F Q. Soil aggregates and fractal features under different land use types in a frequent debris flow area. Journal of Mountain Science, 2013, 10(3): 437—444
- [30] 徐冰, 陈亚新, 郭克贞. 半干旱草地土壤粒径分形维数及空间变异特征. 水利学报, 2007(增刊): 691—695. Xu B, Chen Y X, Guo K Z. Spatial variability of fractal dimension for soil particle in semi-arid grassland (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2007(suppl): 691—695
- [31] Chen J J, He B H, Wang X Y, et al. The effects of Herba Andrographitis hedgerows on soil erodibility and fractal features on sloping cropland in the Three Gorges Reservoir Area. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7063—7070
- [32] Chen X Y, Zhou J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4): 1735—1746
- [33] 吴煜禾, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山不同林地土壤颗粒特征及其与土壤侵蚀的关系. 水土保持学报, 2011, 25(5): 219—223. Wu Y H, Zhang H J, Cheng J H, et al. Soil particles characteristics and the relationship between soil particles and soil erosion in different forestlands in Simian Mountains, Chongqing (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 219—223
- [34] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 377—382. Zhu B B, Li Z B, Li P. Research on the fractal features of soil aggregate and dynamic changes in anti-erodibility during the process of vegetation recovery on the loess hilly areas (In Chinese). Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(4): 377—382

THE INFLUENCE OF SOIL PARTICLES FRACTAL AND RAINFALL ON RUNOFF AND SEDIMENT YIELD IN SHENFU COALFIELD

Guo Mingming¹ Wang Wenlong^{1,2†} Li Jianming¹ Huang Pengfei³ Wang Zhen⁴ Luo Ting⁵ Li Hongwei⁶

(1 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)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Key Laboratory of Soil Erosion and Control, Institute of Soil and Water Conservation in Jiangxi, Nanchang 330029, China)

(4 Huadong Institute of Water Conservation and Hydropower Survey and Design, China Engineering Consulting Corporation, Hangzhou 310014, China)

(5 Hangzhou Earth Science and Technology Co., LTD, Hangzhou 310000, China)

(6 Zhejiang Institute of Water Conservancy and Hydropower Survey and Design, Hangzhou 310014, China)

Abstract During the processes of development and construction of the Shenfu coalfield, generated were large tracts of disturbed land, and large volumes of translocated soil and waste slag, which, unique in soil constitution and complex in underlying surface layer, have become the major source of serious surface runoff and soil and water loss. An artificially

simulated rainfall experiment was carried out to explore effects of rainfall intensity and soil fractal dimension on runoff and sediment yielding from undisturbed land, disturbed land, and piles of translocated soil or waste slag, with undisturbed land as CK. Detailed investigation found that the piles of translocated soils and waste slag had slopes at 40° , their natural angle of repose and the disturbed and undisturbed lands had slopes at 18° . Plots in the experiment field were designed to be $3\text{ m} \times 1\text{ m}$, each, and had two sections, each, set up for monitoring of water flow. Rainfall intensity in the experiment was designed to vary from $1.0 \sim 3.0\text{ mm min}^{-1}$, forming five levels with a interval of 0.5 mm min^{-1} between every two levels. Before the experiment, the rainfall intensity was calibrated repeatedly until uniformity coefficient of the rainfalls reached 85% or higher. Soil particle compositions of the plots were determined with the pipette method. During every rainfall, flow velocity was measured with the dye tracing method and width and depth of the flow with a thin steel rule. For the first 3 minutes of runoff, samples of runoff and sediment were gathered once a minute, and after that once every 3 minutes. Results show that (1) on piles of translocated soil and waste slag, runoff followed the process of spurting-declining-leveling off, while on undisturbed and disturbed lands, it did the process of rising-leveling off. Runoff rate on the underlying surfaces increased with increasing rainfall intensity. (2) Fractal dimension of soil particles on the underlying surfaces of the four plots displayed an order of D_1 (abandoned residue) $< D_2$ (abandoned soil) $< D_3$ (disturbed ground) $< D_4$ (undisturbed ground). Volume of runoff caused by a single rainfall event was found to be in a significant linear relationship with rainfall intensity and a significant power function relationship with fractal dimension. Moreover, between D_1 and D_2 and between D_3 and D_4 existed two critical fractal dimensions, i. e. 2.229 and 2.479, which can be used to distinguish types of underlying surfaces. (3) Erosion on the pile of waste slag followed the process of fluctuating-leveling off, while on the pile of translocated soil, it was characterized by multiple peaks and valleys. On undisturbed and disturbed lands, erosion increased in rate first and then gradually leveled off under rainfall $1.0 \sim 2.5\text{ mm min}^{-1}$ in intensity, and fluctuated drastically under rainfall 3.0 mm min^{-1} in intensity erosion rates on all the four underlying surfaces increased with increasing rainfall intensity. (4) Amount of erosion was found to be in a significant power function relationship with rainfall intensity, and with fractal dimension of soil particles, too. (5) Volume of runoff was in significant linear relationships with rainfall intensity and fractal dimension of soil particles ($M_w = -147.43D_i + 123.46P_i + 268.96$, $R^2 = 0.952$), while yield of sediment was in significant exponential function relationships with the two ($\ln M_s = -11.32D_i + 1.32P_i + 25.83$, $R^2 = 0.844$). The above findings indicate that disturbed land and piles of translocated soil and waste slag, all formed as a result of mining, differ sharply from undisturbed land in rules of runoff and sediment yield, and underlying surface is an affecting factor of runoff and sediment yield that should not be ignored. Fractal dimension of soil particles, as a quantitative indicator of underlying surface, can be used to effectively predict runoff volume and sediment yield. Obviously this study has some important scientific significance to the establishment of a soil erosion model for mining areas.

Key words Shenfu coalfield; Fractal dimension; Rainfall intensity; Runoff rate; Erosion rate

(责任编辑:檀满枝)