神府东胜煤田扰动与原生地面产流产沙规律对比研究

白 芸[1], 王文龙[1,2], 黄鹏飞[3], 李宏伟[4], 王 贞[5], 王正利[6], 李 仁[7]

(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, 江西 南昌 330029; 4. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310014; 5. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 6. 黄河水利委员会 西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000; 7. 吴起县水土保持工作队, 陕西 吴起 717600)

摘 要: 采用野外人工模拟降雨试验方法,对神府东胜煤田开发建设中原生和扰动地面的产流、产沙规律进行了研究。结果表明,扰动地面径流起始时间是原生地面的 1.8～11.7 倍,径流率比原生地面小 5%～54.4%;初始径流含沙量是原生地面的 1.1～5.8 倍,径流含沙量是原生地面的 1.2～6.3 倍,产沙量是原生地面的 2～12.7 倍。由于扰动地面质地疏松,孔隙度大,入渗率大,与原生地面相比,一般在强降水条件下才产流并发生侵蚀。扰动地面临界抗剪力较小,侵蚀一旦发生,在相同降水条件下,更易发生侵蚀,且其侵蚀强度更大。通过回归分析,得出两种下垫面产沙量与水流剪切力呈线性相关。

关键词: 神府东胜煤田; 扰动地面; 原生地面; 产流产沙; 水流剪切力

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2014)03-0033-06 **中图分类号**: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.008

Comparative Study of Runoff and Sediment Yielding from Disturbed and Original Sites in Shenfu—Dongsheng Coalfield

BAI Yun[1], WANG Wen-long[1,2], HUANG Peng-fei[3],
LI Hong-wei[4], WANG Zhen[5], WANG Zheng-li[6], LI Ren[7]

(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 Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Key Laboratory of Soil Erosion and Control, Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi* 330029, *China*; 4. *Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou, Zhejiang* 310014, *China*; 5. *HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang* 310014, *China*; 6. *Xifeng Experimental Station of Soil and Water Conservation, Qingyang, Gansu* 745000, *China*; 7. *Wuqi Soil and Water Conservation Team, Wuqi, Shaanxi* 717600, *China*)

Abstract: The objective of this study was to investigate the law of runoff and sediment yielding from original and disturbed sites in the Shenfu—Dongsheng coalfield by a simulated rainfall experiment. Results showed that the time for runoff initiation in disturbed sites was 1.8 to 11.7 times that in original sites. However, runoff rate for disturbed sites was 5% to 54.4% less than that for original sites. The initial sediment concentration, average sediment concentration and sediment yield in disturbed sites were 1.1 to 5.8, 1.2 to 6.3, and 2 to 12.7 times of those in original sites, respectively. Runoff and soil erosion in disturbed sites occurred under high intensive rainfall because of lower bulk density, higher porosity and greater infiltration rate as compared with original sites. Once erosion began, disturbed sites were subject to erosion under the same rainfall condition due to smaller critical shear resistance and could result in larger erosion rate. It was found by regression analysis, there existed a linear relationship between sediment yield and flow shear stress.

Keywords: Shenfu—Dongsheng coalfield; disturbed site; original site; runoff and sediment yielding; flow shear stress

---

收稿日期:2013-07-13 **修回日期**:2013-10-29

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:以神府东胜煤田为例"(40771127); 水利部公益性行业专项(201201048),(201201047); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(10502-T1)

作者简介:白芸(1990—),女(汉族),陕西省府谷县人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:naitangbby@163.com。

通信作者:王文龙(1964—),男(汉族),陕西省大荔县人,博士,研究员,主要从事开发建设项目及水土保持研究。E-mail:wlwang@nwsuaf.edu.cn。

神府煤田是世界 7 大煤田之一，在中国国民经济与社会发展中占据举足轻重的地位，自 20 世纪 80 年代大规模开发以来，在带动当地经济跨跃式发展的同时，也带来了一定的环境问题。煤田开采过程中地表剥离形成的裸露地表会增加水土流失量[1]，矿渣堆积体会产生大量的径流泥沙量[2]，尤其是露天开采，对地表土的剥离、堆积、填埋形成了大量的人为扰动地面[3-4]，严重加剧了当地的水土流失量。据统计，对于露天开采，每采 1.00×10^4 t 煤炭就有 0.06～0.13 hm^2 的地面遭到扰动，平均为 0.08 hm^2。这种扰动地面土壤结构遭到破坏，颗粒松散，密度相对较小，极易被冲刷，所产生的水土流失属于典型的人为加速侵蚀[4]。John E G 等[5]通过人工模拟降雨试验，对美国北达科他州西部露天煤矿水土流失研究后指出，煤矿开采过程中由于地面扰动，表层土的产沙量是原始草地的 360 倍。随着中国矿区开发过程中产生的水土流失日益严重，也有不少学者开始关注开发建设引起的水土流失问题。但是这些研究主要集中在高陡边坡和堆积体上[6-7]，对扰动地面的研究基本都是采用放水冲刷[8-10]方法，鲜有采用野外人工模拟降雨实验对矿区扰动地面侵蚀产沙机理及影响因素等方面的研究。因此，本文以神府东胜煤田原生地面与扰动地面为研究对象，探讨其产流、产沙规律及水动力学特征，阐明不同下垫面在降雨条件下侵蚀产沙机理，探索人为加速侵蚀过程中侵蚀产沙机理及水动力学参数变化特征，为水土保持方案编制中水土流失预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

神府东胜煤田地处晋陕蒙 3 省交界处，地理坐标为北纬 37°20′—40°16′，东经 108°36′—110°36′。该区目前探明的含煤面积为 31 171.97 km^2，探明储量 2.24×10^{11} t。矿区地面组成物质复杂，主要土壤类型有风沙土、绵沙土、红黄土，其总的特点是结构疏松，极易风化，抗冲抗蚀性极差。该区气候属于典型的干旱半干旱大陆季风性气候，年降雨量分配不均匀，7—9 月占全年降雨量的 65%～70%，且多暴雨，暴雨量占当年降雨总量的 9.6%～33.4%，暴雨洪水侵蚀是矿区水蚀的主要特点，洪水输沙量占全年输沙量的 97%以上。

该区植被主要是耐寒耐旱的小叶灌木、半灌木、沙生植被、草甸植被和盐生植被，主要有天然及人工沙蒿（白沙蒿和黑沙蒿）、沙柳、沙竹、柠条、沙棘、黄蔷薇、臭柏、酸枣及沙樱桃等，沙地植被占绝对优势。

1.2 试验小区概况

考虑到水源、理想下垫面和风等自然条件的限制，原生地面小区选在一块未经人为扰动的面积较大并且坡度合适的撂荒坡地上，植被盖度均匀。扰动地面选在煤矿附近的一个采石场，经过严重扰动，地面破碎，块石已被搬走，余留经过采石后剩余细屑。小区大小为 1 m×3 m（斜坡面积），周围用 5 mm 厚钢板围住。小区内土壤理化性质见表 1。

表 1 扰动地面与原生地面土壤理化性质

下垫面类型	颗粒组成/%			土壤容重/(g·cm^{-3})	
	黏粒（≤ 0.002 mm）	粉粒（0.002～0.05 mm）	砂粒（0.05～2 mm）	降雨前	降雨后
原生地面	4.89	33.46	61.65	1.25	1.29
扰动地面	1.38	22.31	76.31	1.19	1.27

注：数据均为各场次降雨的平均值。

1.3 野外人工模拟降雨试验

试验地点选在神木县西沟乡六道沟村煤矿附近，地点选取的是典型的神府东胜煤田开采区。在试验小区外围，使用 $\Phi48\times3.5$ 的电焊钢管搭建临时降雨棚，四周围有防风布，以尽量减小风对降雨的影响。在垂直距离小区 3 m 上方搭建下喷式降雨器。水源为山顶水窖，并在高于试验小区 8 m 的地方放置 2 m^3 储水箱，储水箱中放置 60 m 扬程水泵用以提供动力。降雨前把处理好的小区用防水塑料布遮盖，率定雨强，率定误差不超过 5%。雨强率定完毕后，迅速掀开塑料布，记录径流起始时间，设计产流历时 45 min，前 3 min 每隔 1 min 接 1 次径流泥沙样，3 min 后每隔 3 min 接 1 次。降雨结束后量测径流泥沙样体积，过滤后用 105 ℃的烘箱烘 24 h 后称重。坡面径流宽度和深度用薄钢尺量测，用以计算水力半径。小区坡度为 5°，10°，18°，降雨强度为 1.0，1.5，2.0，2.5，3.0 mm/min 这 5 个级别，每个试验设置重复 1 次，共计 30 场次。

1.4 数据分析

数据分析采用 Excel 和 SPSS 16.0 完成。

2　结果与讨论

在次降雨过程中,影响产流产沙因素分为降雨因素(降雨量、降雨强度、降水历时)、下垫面因素(下垫面类型、前期含水量、坡度等)和人为活动影响等。此次试验,严格控制降雨强度、降雨历时、下垫面类型、坡度和人为活动等影响。

一些学者[11-12]对黄土坡面降雨入渗的研究结果显示,对同一质地土壤,随着土壤前期含水量增加,坡面径流起始时间缩短,侵蚀产沙量增大。分析不同场次试验土壤前期含水量(表 2),原生地面与扰动地面间土壤前期含水量无显著差异,$p=0.188>0.05$(表 3)。因此,土壤前期含水量对后续试验产沙产流结果的影响予以忽略。

表 2　各场次降雨土壤前期含水量

雨强/(mm·min^{-1})	土壤前期含水量/%					
	18°		5°		10°	
	原生地面	扰动地面	原生地面	扰动地面	原生地面	扰动地面
1.0	8.87	7.08	7.09	6.54	7.50	9.03
1.5	8.45	8.91	8.28	9.07	6.49	8.32
2.0	6.89	8.70	7.96	7.97	6.78	7.58
2.5	7.47	10.94	8.39	6.88	8.29	9.91
3.0	8.58	7.89	8.74	7.89	7.44	8.38

注:含水量均为 0—40 cm 平均含水量。

表 3　原生地面与扰动地面土壤前期含水量单因素方差分析结果

差异源	平方和	自由度	均方	F 统计量	显著性
组间	7.424	5	1.485	1.640	0.188
组内	21.720	24	0.905	—	—
总数	29.150	29	—	—	—

2.1　扰动地面与原生地面径流起始时间分析

径流起始时间为降雨开始到小区全坡面开始产生径流的时间。扰动地面最长径流起始时间为 82.03 min,最短为 5.58 min,原生地面的最长为 31.36 min,最短为 0.52 min。两种下垫面径流起始时间均随着雨强增大而缩短,随坡度增大而缩短。

扰动地面径流起始时间较原生地面长,是原生地面的 1.8～11.7 倍,其中大多(70%)在 3 倍以上,在坡度为 10°,18°,降雨强度为 3.0 mm/min 的暴雨条件下,径流起始时间的增幅甚至达到 10 倍以上(图 1)。研究区内暴雨多为 A 型暴雨,由局部强对流条件引起,具有小范围、短历时、高强度特点,降雨历时一般为 30～120 min,最大 30 min 降雨量占总降雨量的 60%～100%,最大 60 min 降雨量占总雨量的 85%～100%[13]。区内降雨历时一般介于 30～60 min,故选取 45 min 的降雨历时为分界线,雨强为 1.0 mm/min,扰动地面在 3 种坡度下均不产流,根据张汉雄[14]提出的黄土高原暴雨公式知,历时为 45 min,强度为 1.0 mm/min的暴雨,重现期为 15 a。据此可推测,扰动地面的土壤侵蚀一般是在长历时或大雨强下发生的。

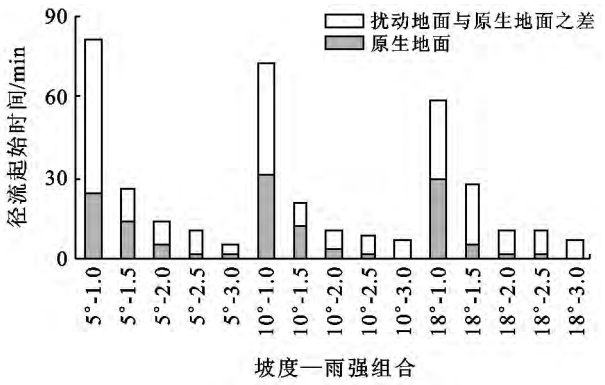


图 1　扰动与原生地面的径流起始时间对比

2.2　扰动地面与原生地面径流分析

径流率即为单位时间内通过径流小区断面的径流量。扰动地面径流率在 0.16～4.92 L/min,原生地面的在 0.23～5.75 L/min,均随着雨强的增大而增大(图 2)。经 SPSS 16.0 回归分析,原生地面在 5°($r^2=0.910$, $p=0.015$),10°($r^2=0.601$, $p=0.123$ 和 18°($r^2=0.954$, $p=0.004$)与扰动地面在 5°($r^2=0.758$, $p=0.055$),10°($r^2=0.903$, $p=0.013$)和 18°($r^2=0.923$, $p=0.009$)时,径流率与降雨强度间呈显著的线性相关。

两种下垫面径流率相比,总体上(70%)扰动地面比原生地面的小 5%～54.4%。分析两种不同下垫面的容重和孔隙度得知,扰动地面容重均值小于原生地面(1.19 ＜1.25 g/m^3),平均孔隙度大于原生地面(55.12%＞53.78%),扰动地面土质疏松、孔隙度大,入渗率比原生地面大,平均入渗深度比原生地面大

(11.3>8.4 cm)。虽然植被可增强入渗,减小地面径流率[15-16],但在本试验中原生地面地表植被对入渗的增加作用略小于扰动地面中扰动对入渗增加的贡献。经 SPSS 16.0 分析知,两种下垫面间径流率差异不显著($p>0.05$)。因此在本试验中原生地面植被与扰动地面的扰动对增加入渗的贡献相当。

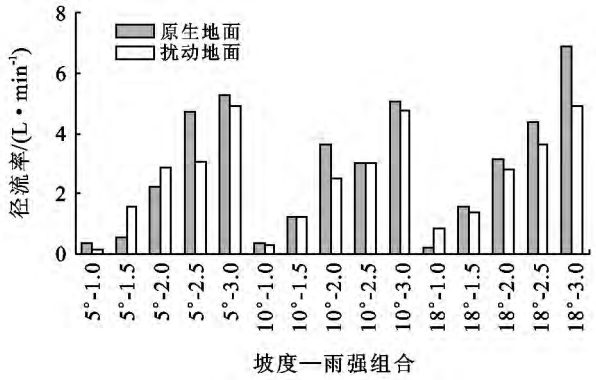


图 2 扰动与原生地面径流率对比

2.3 扰动地面与原生地面初始径流含沙量分析

次降雨的初始径流含沙量即为产流前 3 min 内所取 3 次径流样的含沙量平均值。扰动地面初始径流含沙量在 1.28~34.3 g/L,原生地面的在0.94~19.48 g/L,两种不同下垫面初始含沙量均随雨强和坡度增大而增大,但相关性不显著。不同坡度和雨强下径流初始含沙量扰动地面较原生地面大,前者是后者 1.1~5.8 倍,经 SPSS 16.0 分析表明,两种下垫面之间的差异显著($p=0.012$)。说明地面扰动会明显地使初始含沙量增大。

2.4 扰动地面与原生地面径流含沙量分析

原生地面的径流含沙量值在 1.18~11.66 g/L,扰动地面的在 1.44~39.59 g/L,两种不同下垫面径流含沙量均随坡度增大而增大,随雨强增大有增大趋势。扰动地面的径流含沙量要明显地高于原生地面,前者约是后者的 1.2~6.3 倍(图 3),存在极显著性差异($p=0.000$)。经分析知扰动地面与原生地面间径流率无显著差异,但径流含沙量存在极显著差异,说明扰动地面较原生地面更易形成高含沙径流。

2.5 扰动地面与原生地面产沙量分析

扰动地面的产沙量最小值为 19.57 g(5°,1.0 mm/min 组合设置),最大值为 9 510.66 g(18°,3.0 mm/min 组合设置);原生地面的产沙量最小为 9.48 g(5°,1.0 mm/min组合设置),最大为 3 562.72 g(18°,3.0 mm/min组合设置)。两种下垫面产沙量均随雨强增大而增大,随坡度增大而增大。这是由于坡度增加,使径流流速增大,并且在相同坡长条件下水流用更短的时间流出小区,因此径流量增加,从而径流能量增大,使得径流侵蚀能力增强,进而产沙量上升。

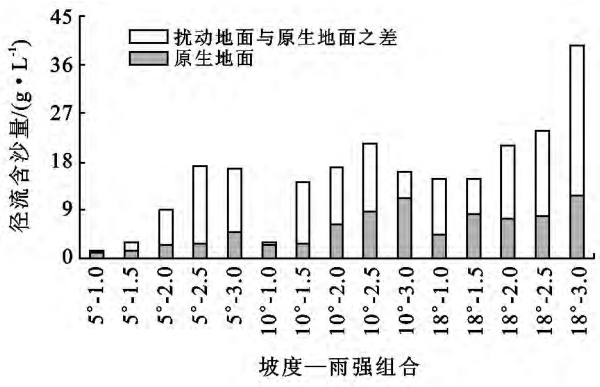


图 3 扰动与原生地面平均径流含沙量对比

扰动地面产沙量大于原生地面,是原生地面的 2~12.7 倍(图 4),呈极显著差异($p=0.000$)。随着坡度和雨强的增大,两者之间差值变大。这是由于扰动地面土壤疏松,土壤结构不稳定,土壤抗蚀性低,且无地表植被保护,抗冲性小,因此产沙量大,在大坡度条件下,扰动地面易发生沟蚀,尤其在大雨强条件下,扰动地面疏松的土壤在雨水长时间浸泡下,变得更松软易蚀,造成产沙量急剧增加。回归分析显示,扰动地面与原生地面的产沙量与雨强及坡度之间均具有良好的线性关系。

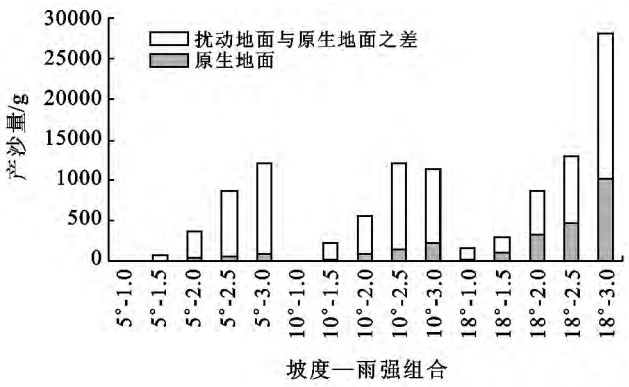


图 4 扰动地面与原生地面产沙量对比

2.6 扰动地面与原生地面水流剪切力分析

水流剪切力是沿着坡面梯度方向运动的水流在其运动方向上产生的作用力。依据式(1)计算[17]:

$$\tau=\rho gRJ=\gamma RJ \quad (1)$$

式中:τ—水流剪切力(Pa);γ——水的容重(N/m³);R——水力半径(m),根据试验中测得的流宽及流深数据计算;ρ——水的密度(kg/m³);g——重力加速度(m/s²);J——水力能坡($J=\tan\theta$,试验为直型坡,θ 取小区坡度)。

水流剪切力的大小决定着水流对土壤剥蚀作用的强弱。扰动地面水流剪切力在 0.84~20.55 N/m²,原

生地面的在 0.81～20.68 N/m²;两种不同类型下垫面水流剪切力随雨强的增大有相同的增大趋势(表 4),但二者的值无显着差异($p>0.05$)。

表 4　不同场次扰动地面与原生地面水流剪切力

坡度/(°)	雨强/(mm·min⁻¹)	水流剪切力/(N·m⁻²)		有效水流剪切力/(N·m⁻²)	
		原生地面	扰动地面	原生地面	扰动地面
5	1.0	0.81	0.84	0.03	0.71
5	1.5	2.21	2.11	1.43	1.98
5	2.0	2.83	2.92	2.05	2.79
5	2.5	5.40	3.34	4.62	3.21
5	3.0	3.56	3.47	2.78	3.34
10	1.0	1.62	1.67	0.84	1.53
10	1.5	5.02	3.03	4.24	2.90
10	2.0	5.13	4.76	4.35	4.62
10	2.5	7.13	5.46	6.35	5.32
10	3.0	7.37	7.09	6.59	6.96
18	1.0	2.88	3.60	2.10	3.47
18	1.5	2.88	5.12	2.10	4.99
18	2.0	7.75	7.82	6.97	7.69
18	2.5	7.68	9.45	6.90	9.32
18	3.0	20.68	20.55	19.90	20.42

注:表中值均为平均值。

利用 SPSS 16.0 对产沙量与水流剪切力间进行回归分析,结果发现产沙量(M)与水流剪切力(τ)之间具有显著的线性关系。原生地面的拟合关系为:

$$M=150.070(\tau-0.780)\quad (R^2=0.754,\text{sig.}=0.000,n=15) \tag{2}$$

扰动地面的拟合关系为:

$$M=472.379(\tau-0.132)\quad (R^2=0.817,\text{sig.}=0.000,n=15) \tag{3}$$

由式(2)和式(3)知,原生地面的临界抗剪力(τ_0)为 0.780 N/m²,扰动地面为 0.132 N/m²,原生地面的临界抗剪力远大于扰动地面,是扰动地面的 7.42 倍。这是由于原生地面较扰动地面容重大,土体密实;且原生地面的土壤黏粒含量较多,小于 0.002 mm 的颗粒含量为 4.89%,大于扰动地面的 1.38%,砂粒含量较小,0.05～2 mm 的颗粒含量为 61.65%,小于扰动地面的 76.31%,加之地表有植被覆盖,土壤的黏聚力大,因此,抗剪切力大。当径流剪切力大于土壤抗剪切力,土壤颗粒被径流分离而发生侵蚀,此时的水流剪切力称为临界剪切力。在相同径流条件下,扰动地面水流剪切力更易达到侵蚀发生的临界条件,从而产生侵蚀。

分析公式(2)和公式(3)亦知,当水流剪切力大于 0.780 N/m² 时,两种下垫面均发生侵蚀,但相同的有效水流剪切力(即水流剪切力超过土壤抗剪切力的部分),在扰动地面上产生的侵蚀量更大。单位有效水流剪切力,在扰动地面引起的土壤侵蚀量为 472.379 g,在原生地面上为 150.07 g,扰动地面是原生地面的 3.15 倍。同时,分析各场次降雨的水流剪切力发现,在相同降雨条件下,扰动地面的水流剪切力在 0.84～20.55 N/m²,原生地面的在 0.81～20.68 N/m²,扰动地面的有效水流剪切力更大(表 4),且两种下垫面在相同雨强条件下水流剪切力无显着差异,因此,与原生地面相比,在雨强相同时,扰动地面更易发生侵蚀,且一旦侵蚀发生,侵蚀量更大。

综合上述,从侵蚀发生的机理上解释在雨强相同时,一旦产生径流,扰动地面的侵蚀量更大的原因有以下两个:(1) 单位有效水流剪切力在扰动地面上产生的土壤侵蚀量大于原生地面;(2) 在相同雨强条件下,扰动地面的有效水流剪切力大于原生地面,且第一个原因为主要原因。

3　结 论

(1) 两种下垫面的径流起始时间均随着坡度的增大而缩短,随着雨强的增大而缩短,与原生地面相比,由于扰动地面的土质疏松,孔隙度大,径流起始时间长,是原生地面的 1.8～11.7 倍;径流率小,较原生地面小 5%～54.4%。

(2) 扰动地面一般在强降雨条件下才会发生侵蚀(降雨历时为 45 min,暴雨重现率在 15 a 以上),但是一旦发生侵蚀,在相同的降雨条件下,比原生地面更易被侵蚀,侵蚀强度更大。扰动地面的初始径流含沙量,平均径流含沙量和产沙量均较大,分别是原生地面的 1.1～5.8,1.2～6.3 和 2～12.7 倍。

(3) 两种下垫面的产沙量与水流剪切力间均存在显著线性相关,扰动地面的临界水流剪切力小于原生地面。在相同雨强条件下,扰动地面的有效水流剪切力大于原生地面,且单位有效水流剪切力所产生的土壤侵蚀量,扰动地面是原生地面的 3.15 倍,从发生机理上解释了相同雨强下扰动地面侵蚀量更大的原因。

[参 考 文 献]

[1] Cooke R U, Doornkamp J C. Geomorphology in environmental management: A new introduction [M] New York: Oxford University Press, 1990.

[2] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines [J]. Australian Journal Soil Research, 2000,2(38):313-327.

[3] Deniz M. Environmental impacts of coal mining and coal utilization in the UK [J]. Acta Montanistica Slovaca, 2010,2(15):134-144.

[4] 李锐,唐克丽. 神府—东胜矿区一、二期工程环境效应考察[J]. 水土保持研究,1994,1(4):5-17.

[5] Gilley J E, Gee G W, Bauer A. Runoff and erosion characteristics of surface-mined sites in Western North Dakota[J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1977,20(7):697-700.

[6] 张胜利,任京柱. 开矿对小流域水沙的影响研究[J]. 水土保持学报,1992,6(2):76-79.

[7] 王治国,白中科,赵景奎,等. 黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究[J]. 水土保持学报,1994,8(2):10-17.

[8] 白中科,胡振华,王治国. 露天矿排土场人为加速侵蚀及分类研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):34-40.

[9] 王文龙,王兆印,李占斌,等. 神府东胜煤田开发中扰动地面径流泥沙模拟研究[J]. 泥沙研究,2006,4(2):60-64.

[10] 罗婷,王文龙,王贞,等. 神府东胜煤田开发建设中扰动地面产流产沙试验研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(4):59-63.

[11] 陈洪松,邵明安,王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(1):44-47.

[12] 张玉斌,郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):5-10.

[13] 焦菊英,王万忠,郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J]. 干旱区资源与环境,1999,13(1):34-42.

[14] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. 地理学报,1983,38(4):416-425.

[15] 李淼,宋孝玉,沈冰,等. 黄土沟壑区不同植被对产流产沙的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):117-120.

[16] Jordán A, Martínez-Zavala L. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in Southern Spain after simulated rainfall [J]. Forest Ecology and Management, 2008,255(3/4):913-919.

[17] Bagnold R. An approach to the sediment transport problem from general physics[R]. Geological Survey Professional Paper (United States), 1966:422-437.

(上接第 32 页)

[参 考 文 献]

[1] 郑粉莉,江忠善,高学田. 水蚀过程与预报模型[M]. 北京:科学出版社,2008.

[2] 朱显谟. 黄土高原水流侵蚀的主要类型及有关因素[J]. 水土保持通报,1982,2(3):40-44.

[3] Ellison W D. Soil erosion studies [J]. Agricultural Engineering, 1947,28(4):145-146.

[4] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. Earth Surf., Processes Landforms, 1986,11:515-524.

[5] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991,55(2):339-344.

[6] 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):5-7.

[7] 张科利,秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):41-46.

[8] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特性的研究[J]. 泥沙研究,1999(1):56-61.

[9] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J]. 水土保持通报,2001,21(1):23-25.

[10] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J]. 泥沙研究,2002(4):69-74.

[11] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(3):72-75.

[12] 徐天献. 长江上游坡耕地细沟径流水动力学特征研究[J]. 亚热带水土保持,2013,25(2):1-6,11.

[13] 肖培青,郑粉莉,张成娥. 细沟侵蚀过程与细沟水流水力学参数的关系研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1):54-57,125.