

DOI: 10.11766/trxb201705270151

模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的 减水减沙效益*

杨波¹ 王文龙^{1, 2, 3†} 郭明明¹ 康宏亮¹ 白芸³ 李建明⁴

(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 榆林学院陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000)

(4 长江科学院水土保持研究所, 武汉 430010)

摘要 采用野外人工模拟降雨方法, 以未防护弃渣体边坡为对照, 研究了1.0、1.5 mm min⁻¹ 降雨强度条件下神府矿区种草和鱼鳞坑措施对偏土质、偏石质和煤矸石弃渣体产流产沙的调控作用。结果表明: (1) 不同措施下3种弃渣体边坡径流率均在产流6~9 min后趋于稳定, 产流过程中弃渣体边坡侵蚀速率均呈波动减小趋势, 且未防护坡面减小趋势较防护更明显。(2) 植草对偏土质、偏石质、煤矸石弃渣体减水和减沙效益分别为42.91%~51.21%、26.28%~55.20%、10.33%和97.54%~97.95%、41.87%~42.26%、7.80%; 鱼鳞坑的减水和减沙效益则分别为: 51.89%~72.72%、22.37%~42.92%、21.32%和98.41%~99.30%、94.90%~91.84%、39.50%。(3) 鱼鳞坑措施对偏土质弃渣体的减水和减沙效益较种草分别提高8.98%~21.51%和0.46%~1.76%; 种草措施对偏石质和煤矸石弃渣体的减水和减沙效益较鱼鳞坑措施分别提高3.91%~12.28%和0.28%~3.06%及10.99%和31.70%。(4) 3种未防护弃渣体的侵蚀速率和径流率呈显著线性关系, 种草和鱼鳞坑措施改变了坡面水沙关系, 侵蚀速率和径流率相关性减弱或无显著关系。研究结果可为矿区弃渣体边坡生态恢复措施布设提供科学指导。

关键词 神府煤田; 弃渣体; 鱼鳞坑; 植被措施; 径流率; 侵蚀速率

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

神府矿区煤炭资源富集, 露天开采是该区主要的煤矿开采方式。资料显示^[1], 露天煤矿每采万吨煤约破坏土地面积0.1 hm², 约排放剥离物20 000~61 000 m³。大面积的开采和排废不仅破坏和扰动原始地面, 还产生大量的弃土弃渣体, 引发了剧烈的新增水土流失, 导致矿区生态环境遭到严重破坏。

当前矿区生态环境问题已经得到了社会的广泛关注和重视^[2-4], 矿区水土流失控制已成为解决当

地生态环境问题的重点内容之一。弃土弃渣等工程堆积体类型繁多、形态各异^[5-6], 且具有物质组成复杂, 堆积坡度大, 结构疏松, 稳定性差等特点, 堆积体边坡坡面可蚀性是破坏前土壤的10倍~100倍^[7], Zhou等^[8]研究表明露天煤矿复垦土地有机碳、氮含量需要20a时间才可恢复至开采前的水平。因此诸多学者针对矿区弃土弃渣体土壤侵蚀问题做了大量研究。多通过人工模拟降雨^[9-14]、放水冲刷^[6, 15-17]以及小区定位观测^[18]的方法, 集

* 国家重点研发计划重点专项项目 (YS2016YFSF030019) 和国家自然科学基金项目 (40771127) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.YS2016YFSF030019) and the National Natural Science Foundation of China (No.40771127)

† 通讯作者 Corresponding author: wllwang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 杨波 (1993—), 男, 陕西商南人, 硕士研究生。主要从事开发建设项目水土保持。E-mail: 584431911@qq.com

收稿日期: 2017-05-27; 收到修改稿日期: 2017-07-10; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-07-25

中研究了弃土弃渣堆积体产流产沙特性、水动力学参数变化以及侵蚀速率预测。郭明明等^[10]认为弃渣体坡面径流率随产流历时呈现“增长-下降-稳定”的过程。王贞等^[13]研究了神东煤田扰动地面径流特性,发现扰动地面坡面径流雷诺数和阻力系数均较原始坡面高。张乐涛等^[17]认为水流功率是预测公路弃土堆积体坡面侵蚀的最佳水动力学参数。郭明明等^[14]采用了中值粒径、分形维数、降雨强度、坡度及径流参数建立了弃土弃渣体土壤侵蚀预测模型。而在针对矿区弃土弃渣体水土流失治理措施防护方面,田野^[12]研究了弃渣体边坡措施的水土保持效益,认为水平阶护坡改变坡面物理特性,减流效果可达15.84%。刘瑞顺等^[18]在年限为1a的排土场边坡通过野外径流小区定位观测得出,稻草帘子和沙打旺措施的减水减沙效益分别达60%和90%以上。以往的研究大都集中在矿区弃土弃渣堆积体水土流失规律及机制层面上,而在针对矿区弃渣体生态修复方面研究不够深入,尤其是在弃土弃渣堆积初期短历时强降雨条件下工程措施与植被措施对坡面水沙关系的研究还少有报道。

鉴于此,本文通过模拟降雨的方法研究植被措施(种草)和工程措施(鱼鳞坑)对偏土质和偏石质弃渣体以及煤矸石弃渣体这3种矿区典型堆积体边坡减水减沙效益及水沙关系调控作用,探索矿区不同弃渣场最佳治理方式,为神府矿区初期的弃土弃渣堆积体能够快速有效地进行生态恢复提供一定的参考和指导,也为该区建立开发建设项目水土流失模型提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

神府东胜煤田地处于晋陕蒙三省交界处(37°20'~40°16' N, 108°36'~110°3' E),包括陕西的榆林市、内蒙古的鄂尔多斯市和山西省忻州市的部分地区;目前是我国已探明的最大煤田,占全国探明储量的15%;该区位于黄土高原地区的风蚀水蚀交错地带,属于干旱半干旱气候,年均气温为6.1~9.1℃,多年平均降雨量为325~460 mm,且多集中于7—9月,常以暴雨形式发生,降雨量占到全年的65%~70%,年蒸发量为1636~2535 mm,自然条件恶劣,生态环境十分脆弱,该区土壤多以风沙土和黄土为主,结构复杂,易风化,抗侵

蚀能力差,神府东胜矿区内的植被主要是冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng. Syst. Veg.)、沙柳(*Salix cheilophila*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)等耐旱的沙生植物,区内植被覆盖度很低,加之人类活动影响,使该地区生态环境十分脆弱,是我国水土流失最为严重的地区,也是黄河泥沙的主要来源地。

1.2 试验因素的选取

调查发现,矿区最常见的堆积体是由煤矿开采过程中形成的大量弃土、弃渣、弃石及其他废弃物的混合堆砌而成,颗粒成分以砾石、碎石、风沙土和黄绵土为主,组成成分种类复杂,颗粒粒径差异大,含砾石较多,疏松多孔,易发生侵蚀。试验选取该矿区中具有代表性的偏土质弃渣体(土石比约2:1)、偏石质弃渣体(土石比约1:2)、及经过3~5a风化后形成的细碎石渣和土粒混合的煤矸石堆积体。前2种弃渣体颗粒组成见表1;实地调查发现,3种堆积体坡度多集中在33°~39°,所占比例在90%以上,因此试验小区坡度选择为35°;根据当地多年侵蚀性短历时典型暴雨特性,雨强设计为1.0 mm min⁻¹和1.5 mm min⁻¹,降雨历时为24 min。

1.3 试验布设

本次试验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,径流小区为在弃渣体上安置3m×1m×1m的钢槽,内置弃土弃渣体后小区表面需人工平整处理,小区下端设钢制集流槽,并在距离顶部1m和2m处设置测流断面;弃渣体坡面防护措施为人工移植种草和布设鱼鳞坑2种,移植的草为矿区周围农地上人工种植的两年生冰草,挑选长势良好的株高相近的冰草,将其植入弃渣体约20~30 cm深,从小区顶端开始每隔50 cm水平布设草带,草带长宽为0.9 m×0.2 m,采取移植的主要原因是为了保证在试验时3种弃渣体坡面的植被条件一致。鱼鳞坑处理是在坡面上临时开挖鱼鳞坑,坑的直径为50 cm,深30 cm。鱼鳞坑呈三角形排列,沿小区坡面等距布设,坑与坑之间的纵向距离为0.5 m。移植种草小区布设完毕后,周围设立警示标志,以防止人为干扰破坏,每天用喷壶进行浇水养护并观察长势,2周左右,待冰草扎根较好能正常生长且每株草周围土壤固结良好时进行试验。开始实验前,在小区周围用3.0 m高的钢管搭建降雨棚,在正上方布设下喷式模拟降雨器,降

表1 土壤颗粒组成

Table 1 Particle size composition of the soil

粒径大小 Particle size (mm)	质量百分比 Mass percent (%)	
	偏土质堆积体 Earthy slope of slag	偏石质堆积体 Rocky slope of slag
< 0.01	0.43	0.35
0.01 ~ 0.1	6.85	4.13
0.1 ~ 0.5	17.08	10.41
0.5 ~ 1	10.33	7.13
1 ~ 2	20.25	8.65
2 ~ 5	32.97	21.21
> 5	12.09	48.12

雨机型号为槽式人工模拟降雨机, 喷头高度为3.0 m, 喷头间距1.0 m, 降雨雨滴终速接近天然降雨, 降雨均匀系数在80%以上, 并在小区上方放置2 m³ 储水桶, 采用60 m扬程水泵抽取储水桶中的水, 通过阀门和压力表来控制雨强(如图1), 小区周围用帆布围住以减少风对试验的影响。本研究共设计3 × 1 × 2 × 3=18场降雨试验。

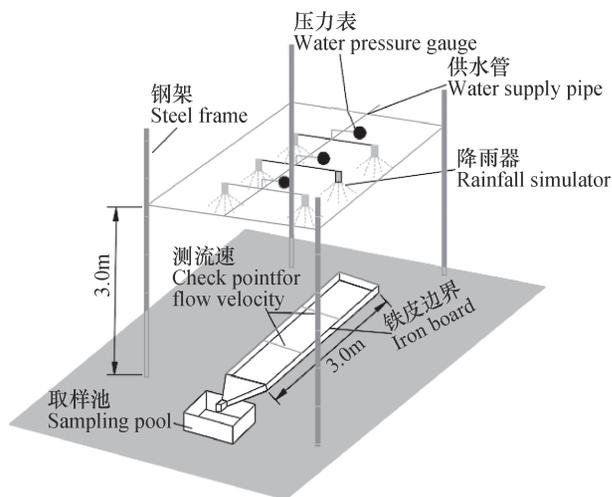


图1 试验模型示意图

Fig. 1 Sketch of experimental model

1.4 试验过程与数据采集

试验前用遮雨布遮盖小区, 降雨器开启后先率定雨强, 率定雨强与设计值误差控制在5%以内, 均匀度在80%以上即满足要求^[19], 雨强达到要求后, 快速掀起小区上方的遮雨布, 待坡面开始产流后使用秒表计时, 并在集流槽出口处用径流桶收集径流泥沙样, 同时记录接样时间, 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, 产流历时24 min, 接样同时用高锰酸钾溶液和秒表测流速, 取2个断面的平均值作为坡面流速, 将所测流速乘以0.75得到较为理想的径流流速^[20], 使用精度1 mm的钢尺测量径流宽度和深度, 同一个断面多次测量取平均值, 用普通温度计测量水温, 采用烘干法确定泥沙重量。

1.5 数据计算与处理

采用Excel 2010和SPSS17.0进行数据统计分析, 用Origin 2016进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 弃渣体产流特征

2.1.1 径流率随时间的变化 图2~图4分别为1.0、1.5 mm min⁻¹雨强下偏土质、偏石质和煤矸石弃渣体在未防护、种草、布设鱼鳞坑措施下边坡的径流率随降雨历时的变化。由图可知, 3种弃渣体的径流率在产流6~9 min后逐渐趋于稳定。对于偏土质弃渣体(图2), 1.0、1.5 mm min⁻¹雨强情况下, 未防护坡面径流率随降雨历时呈“下降—稳定”的变化趋势, 这与坡面结皮的产生和破坏过程密切相关, 当一定含量的砾石镶嵌于地表土壤时, 结皮强度将大大增加, 坡面入渗速率较小^[21], 而当径流对坡面经过一定时间的冲刷后, 使得结皮破坏, 入渗速率增大, 并随着土壤水分的增加逐渐趋于稳定; 种草和鱼鳞坑2种防护措施下坡面径流率随降雨历时则呈“增大—稳定”的变化趋势。2种雨强条件下, 种草和鱼鳞坑2种措施下坡面起始径流率(产流前1 min的径流率)较未防护坡面分别

减小80.40%、90.71%和83.65%、89.65%。对于偏石质弃渣体（图3），2种雨强下不同措施径流率均呈先增大后稳定的变化趋势。对于煤矸石堆积体（图4），1.0 mm min⁻¹雨强下，与防护坡面不同，在未防护坡面未观测到产流现象，可能是由于煤矸石堆积体大孔隙较多，Wang等^[22]研究表明粉煤灰和煤矸石的混合物具有与土壤相似的水力特性，尤其是具有较高的含水能力和渗透性能，加上相对雨强较小时，会导致降雨全部就地入渗，而在种草和布设鱼鳞坑时对煤矸石弃渣体坡面表层物质结构进行了重塑，使得弃渣体边坡表面大孔隙数量大大降低，从而促进了产流。在2种降雨强度条件下坡

面径流率随降雨历时均呈现先增加后稳定的变化趋势。

虽然煤矸石在1.0 mm min⁻¹表面未观测到产流现象，说明径流全部下渗形成壤中流，有可能进一步入渗至堆积体和原始地面界面容易形成滑动面，长时间的降雨也使堆积体内部摩擦力减小，从而容易诱发大面积的滑坡和坍塌事故，尤其在长历时强降雨条件下更易发生此类重力侵蚀事件；其次，该区露天煤矿排矸量较大，不仅压占大量土地而且影响该区的景观格局和生态环境质量^[23]，因此，煤矸石堆积体不仅需要重点防护滑坡等重力侵蚀事件，还需对煤矸石堆积体进行必要的生态恢复。

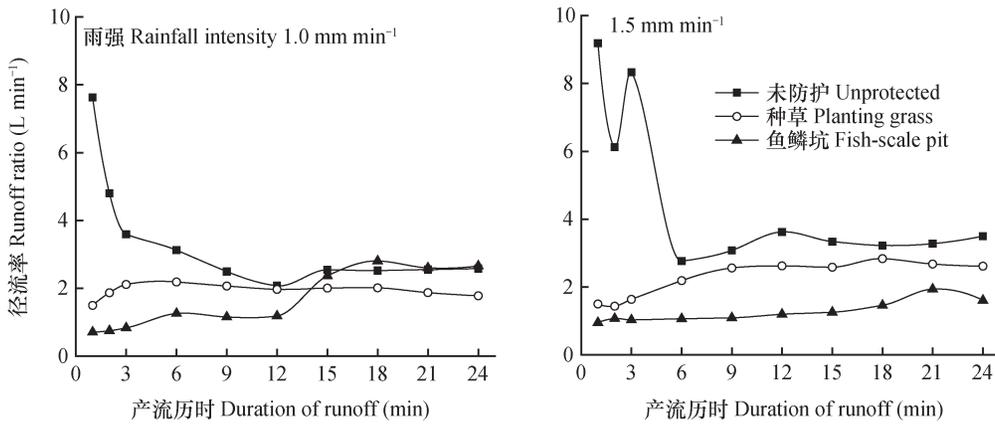


图2 偏土质弃渣体径流率随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of soil runoff rate on the earthy slope

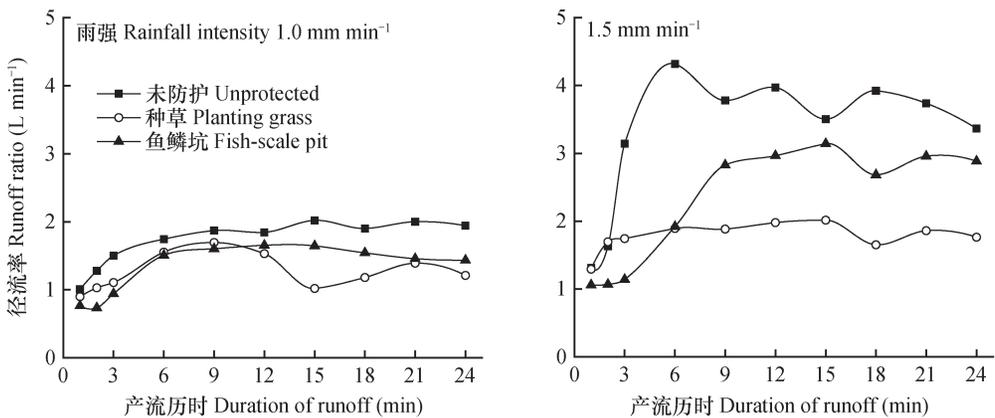


图3 偏石质弃渣体径流率随时间的变化

Fig. 3 Temporal variation of soil runoff rate on the rocky slope

2.1.2 不同防护措施的减水效益 图5为1.0、1.5 mm min⁻¹雨强下不同类型弃渣体在不同防护措施下的平均径流率变化特征。偏土质弃渣体在未

防护、种草、鱼鳞坑措施下的平均径流率分别为3.39、1.94、1.63 L min⁻¹和4.64、2.27、1.27 L min⁻¹，2种措施的减水效益分别为42.91%、51.89%和

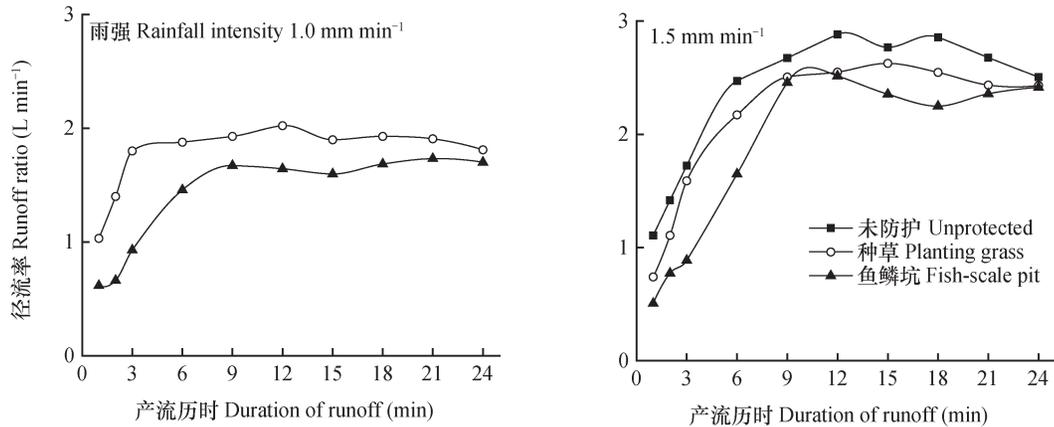


图4 煤矸石弃渣体坡面径流率随时间的变化

Fig. 4 Temporal variation of soil runoff rate on the slope of gangue

51.21%、72.72%，可见，2种措施的减水效益十分明显，且鱼鳞坑的减水效益较种草高8.98%~21.51%，这是因为鱼鳞坑具有通过改变坡面局部地形，增加地面粗糙度以削弱径流的能力^[11]；1.5 mm min⁻¹雨强时，2种措施的减水效益较1.0 mm min⁻¹雨强增加8.3%和20.83%，这表明雨强越大，鱼鳞坑的蓄水潜力较草被更大。偏石质弃渣体在未防护、种草、鱼鳞坑措施下的平均径流率分别为1.71、1.26、1.33 L min⁻¹和3.97、1.78、2.26 L min⁻¹，种草和鱼鳞坑的减水效率分别为26.28%、22.37%和55.20%、42.92%，种草对于偏石质弃渣体坡面径流的消减效果较鱼鳞坑好，其减水效益较鱼鳞坑措施高3.91%~12.28%。对于煤矸石弃渣体而言，1.0 mm min⁻¹雨强下种草坡面径流率较鱼鳞坑

措施降低17.88%；雨强1.5 mm min⁻¹时，未防护和2种措施防护的坡面平均径流率为2.31、1.82、2.07 L min⁻¹，2种措施减水效益分别为21.32%和10.33%，草被的减水效益也优于鱼鳞坑，其减水效益较鱼鳞坑措施高10.99%。与偏土质相反，偏石质、石质（煤矸石）弃渣体种草措施减水效益均较鱼鳞坑措施好，一方面可能是由于植被上部叶片拦截降雨，枝干又拦截了一定的径流，使流速降低，径流能量减少，从而降低其挟沙能力。另一方面可能是由于土粒在沿坡面根茎连接处沉积构成微型虑水土体，对径流产生拦截和过滤作用^[24]；而砾石也具有改变径流路径削弱径流的能力^[25-26]，二者的共同作用使得下渗作用更强；而鱼鳞坑措施仅仅是改变了小地形，短时间内拦截了降雨，效果

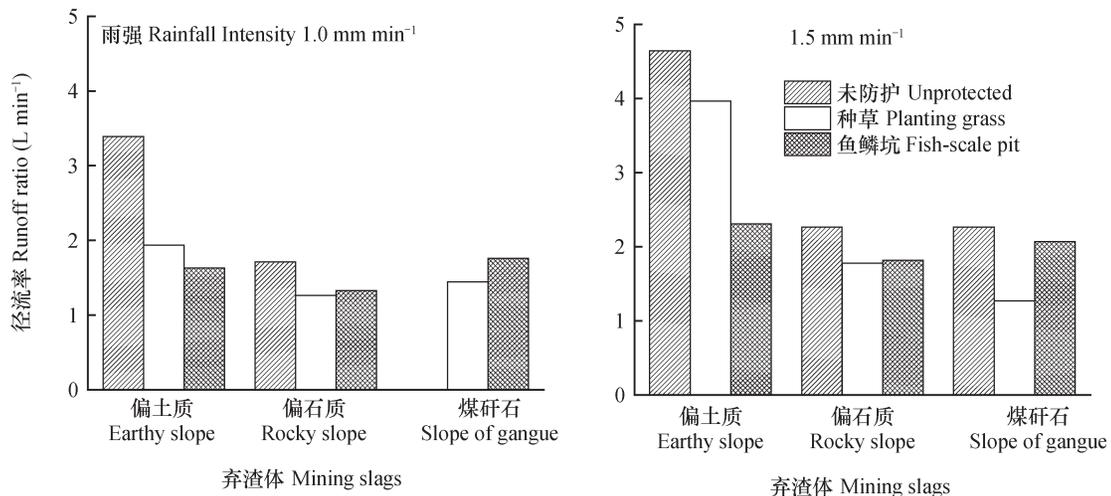


图5 不同防护措施弃渣体边坡的平均径流率

Fig. 5 Variation of average runoff ratio on the slopes of slag

略低于种草。

2.2 弃渣体产沙特征

2.2.1 侵蚀速率随时间的变化 图6~图8分别为1.0、1.5 mm min⁻¹雨强下偏土质、偏石质和煤矸石弃渣体在未防护、种草、布设鱼鳞坑措施下边坡的侵蚀速率随产流历时的变化。

由图可知，3种弃渣体在不同雨强条件下边坡侵蚀速率均呈波动减小趋势，且未防护减小趋势较防护的明显。对于偏土质堆积体（图6），未防护坡面侵蚀速率在0~6 min波动剧烈，而两种防护措施下的侵蚀速率则波动较小，1.0 mm min⁻¹和1.5 mm min⁻¹雨强下侵蚀速率峰值分别达到9521 g min⁻¹和15531 g min⁻¹，远大于2种防护措施下的侵蚀速率，这是因为弃渣体结构性、稳定性差，不具有良好土壤的各项物理化学性质^[27]，在产流初

期表层粘结性较好的细颗粒容易被侵蚀，而留下稳定性较差的大颗粒物，因此导致降雨前期侵蚀速率波动较大。对于偏石质堆积体（图7），在1.0 mm min⁻¹和1.5 mm min⁻¹雨强条件下未防护坡面侵蚀速率随时间的变化差异较大，种草和鱼鳞坑措施防护坡面侵蚀速率差异较小，总体上呈现下降的趋势；在1.5 mm min⁻¹雨强时，偏石质弃渣体同样是在产流前期起伏较大，后期较小，原因可能是因为随着坡面细颗粒逐渐被搬运，弃渣体中未被侵蚀的大颗粒之间相互支撑形成了稳定渣床面^[10]，侵蚀速率逐渐稳定下来，但相比偏土质弃渣体则波动大，说明砾石的存在影响了降雨的侵蚀作用^[24]，使堆积体侵蚀差异性增大；对于煤矸石弃渣体（图8），其侵蚀速率随时间的变化呈多峰多谷型，这与煤矸石弃渣体的物质结构的复杂性关系密切。

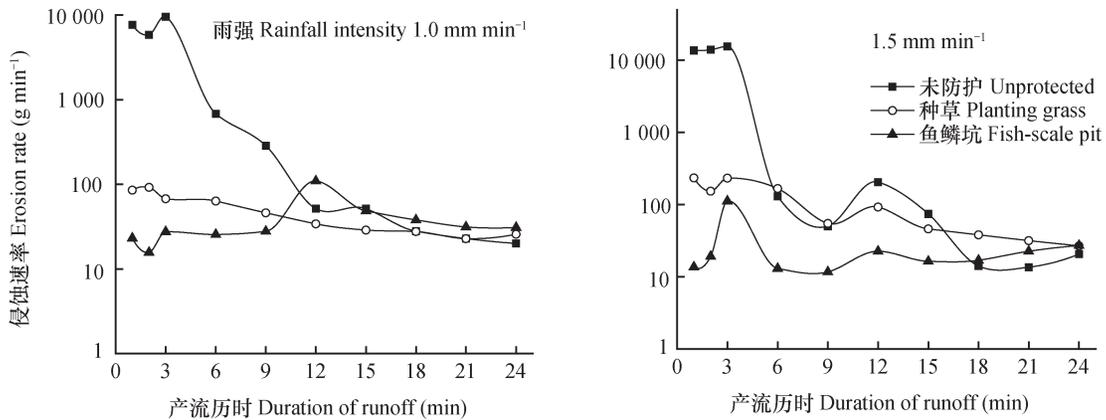


图6 偏土质弃渣体侵蚀速率随时间的变化

Fig. 6 Temporal variation of soil erosion rate on the earthy slope

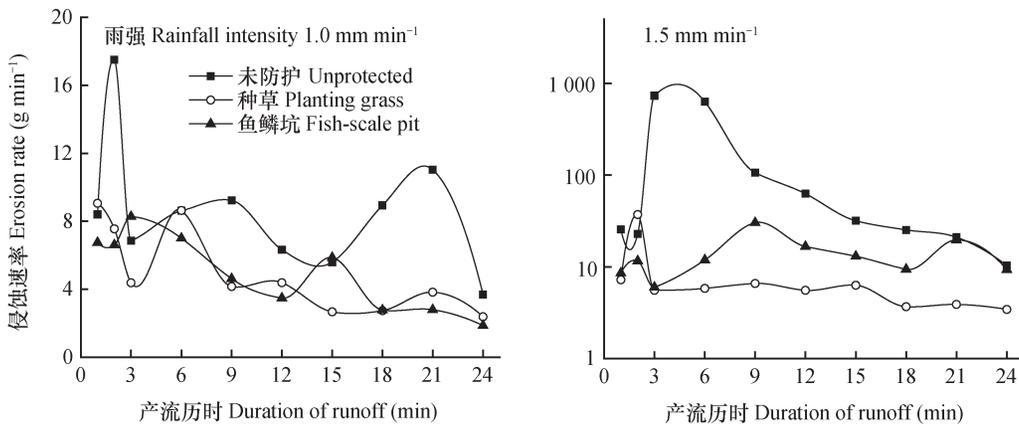


图7 偏石质弃渣体侵蚀速率随时间的变化

Fig. 7 Temporal variation of soil erosion rate on the rocky slope

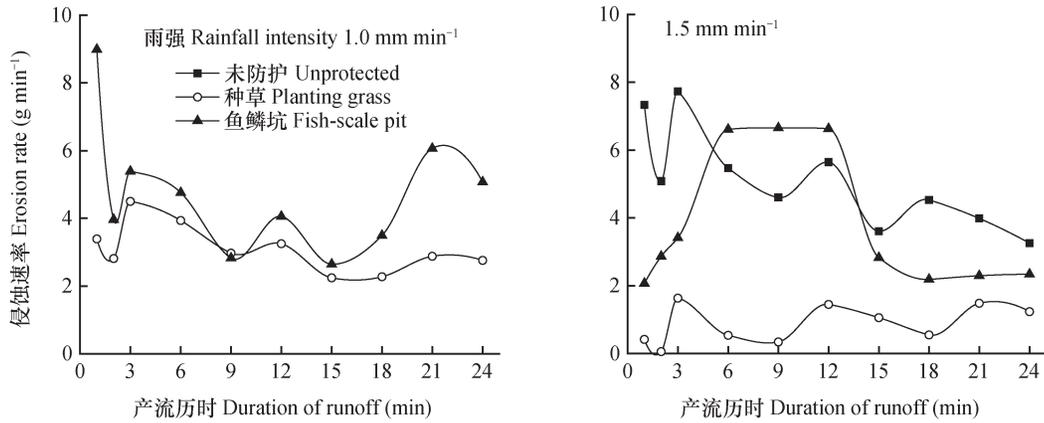


图8 煤矸石弃渣体坡面侵蚀速率随时间的变化

Fig. 8 Temporal variation of soil erosion rate on the slope of gangue

2.2.2 不同防护措施的减沙效益 图9为1.0和1.5 mm min⁻¹雨强下不同类型弃渣体在不同防护措施下平均侵蚀速率变化。由图可知，偏土质弃渣体边坡平均侵蚀速率均远大于偏石质和煤矸石弃渣体。对于偏土质，2种防护措施的减沙效益十分明显，1.0和1.5 mm min⁻¹雨强时未防护坡面、种草和鱼鳞坑坡面平均侵蚀速率分别为2411、49.31、37.75 g min⁻¹和4355、107、27.43 g min⁻¹，2种措施在2种雨强条件下减沙效益分别高达97.95%、98.41%和97.54%、99.30%，这表明鱼鳞坑措施减沙效益较种草高出0.46%~1.76%，具有更高的防护效益^[12]。雨强由1.0 mm min⁻¹增大至1.5 mm min⁻¹时，未防护坡面侵蚀速率增加81.64%，因此，对于矿区裸露偏土质弃渣体的防护显得尤为重要。与偏土质弃渣体相比，偏石质弃渣堆积体边坡平均侵蚀速率要小很多，其未防护坡面在

2种雨强下的平均侵蚀速率较偏土质堆积体降低99.6%、96.2%，说明砾石的存在明显减小了土壤可蚀性；2种雨强条件下2种措施的减沙效益分别为42.26%、41.98%和94.90%、91.84%，种草措施的减沙效益较鱼鳞坑措施高0.28%~3.06%。煤矸石弃渣体由于所含成份复杂、含细小煤灰较多，黏性较大，故在1.0 mm min⁻¹雨强下2种措施的侵蚀速率较小，分别为0.88、3.79 g min⁻¹，雨强为1.5 mm min⁻¹时，未防护坡面侵蚀速率为5.12 g min⁻¹，相比其他2类弃渣体其侵蚀速率降低了很多，2种措施的减沙效益分别为39.50%和7.80%，种草措施的减沙效益较鱼鳞坑措施高31.70%。

2.3 弃渣体坡面水沙关系对不同防护措施的响应

表2为3种弃渣体在未防护、种草、鱼鳞坑措施下，侵蚀速率与径流率的拟合方程。由表2可知，3种弃渣体坡面在未采取防护措施的情况下，侵蚀

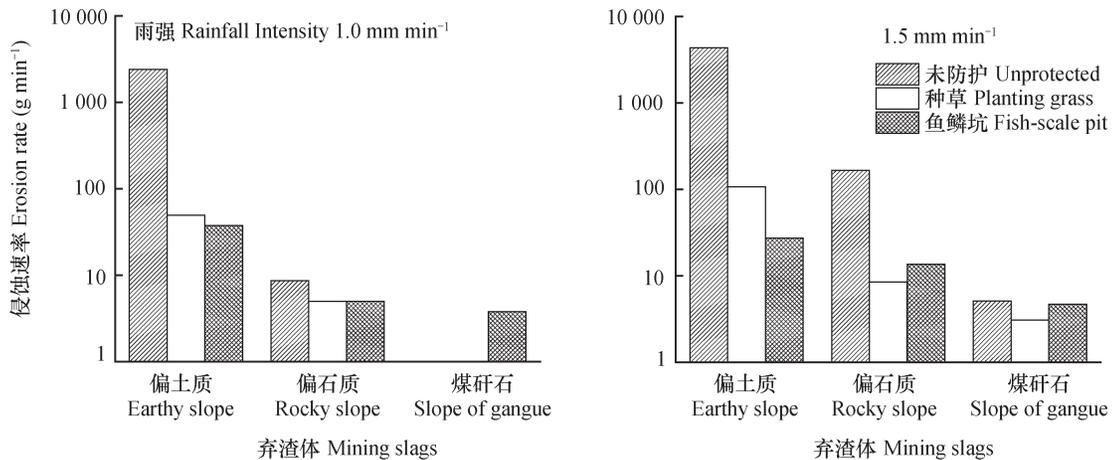


图9 不同防护措施弃渣体边坡的平均侵蚀速率

Fig. 9 Variation of average erosion rate on the slopes of slag

表2 不同措施条件下3类弃渣体侵蚀速率与径流率相关性

		偏土质	偏石质	煤矸石
		Earthy slope	Rocky slope	Slope of coal gangue
未防护 Unprotected	相关系数	0.881**	0.806**	-0.671**
	显著性	< 0.01	< 0.01	0.034
	拟合方程	$y = 2309.3x - 5891.2$	$y = 81.786x - 144.29$	$y = -1.5408x + 8.68$
种草 Planting grass	相关系数	-0.501*	0.111	-0.178
	显著性	0.024	0.641	0.453
	拟合方程	$y = -169.6 \ln(x) + 200.71$	$y = 3.4881e^{0.2753x}$	$y = -0.4298x + 2.8111$
鱼鳞坑 Fish scale pit	相关系数	0.054	0.621**	-0.102
	显著性	0.823	0.003	0.668
	拟合方程	$y = 18.614e^{0.2356x}$	$y = 5.1816x + 0.0119$	$y = -0.2845x + 4.7206$

注: *表示0.05水平上显著相关, **表示0.01水平上极显著相关Note: * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

速率与径流率均呈极显著线性关系。其中, 偏土质和偏石质弃渣体侵蚀速率随径流率的增大而增大, 而煤矸石弃渣体坡面上侵蚀速率随径流率增大而减小, 原因是因为粉煤灰和煤矸石的混合物具有与土壤相似的水力学特性^[22], 在降雨初期, 水分下渗较多, 导致坡面径流量小, 而坡面易蚀细颗粒大量存在, 故侵蚀量较大; 随着降雨历时的延长, 土层含水量逐渐达到饱和, 水分入渗减弱, 坡面细颗粒减少, 致使径流率大而侵蚀量小。

在种草措施下, 偏土质弃渣体侵蚀速率和径流率呈显著对数关系, 而在偏石质和煤矸石弃渣体坡面上二者相关性不显著; 鱼鳞坑措施下, 除偏石质弃渣体的侵蚀速率和径流率具有极显著线性关系外, 在偏土质和煤矸石弃渣体坡面上, 二者相关性未达到显著性水平。这表明, 这2种防护措施对弃土弃渣体边坡土壤侵蚀速率与径流率的关系产生了重要影响^[12, 18]。对于植被措施而言, (1) 冰草是一种良好的水土保持和防风固沙植物, 其根为须状, 密生且具有入土较深的点^[28], 因而可深入土壤深层, 提高土壤透水性和保水能力, 降低地表径流和冲刷。(2) 植被根系能够改变土壤疏松程度, 增加土壤孔隙度, 根系对土体具有拉伸和固持作用, 有利于增加降雨入渗能力^[29]和土壤持水能力, 同时使土壤表层出现结皮^[30], 植被促进入渗能力主要是因为地表覆盖层和根系土壤层对水分的截留和吸收, 进一步延缓径流流速, 从而减弱了降

雨径流对表层土壤的冲刷作用; (3) 植被冠层对降雨的拦截作用较强, 可降低雨滴的动能^[31], 减轻雨滴对地面的直接打击作用, 降低击溅侵蚀, 致使侵蚀速率随之降低, 最终导致侵蚀速率和径流率的相关性较小。就鱼鳞坑措施而言, 其作为水土保持工程措施能够改变局部小地形, 在降雨期间能够有效蓄积储存降雨, 拦蓄坡面降雨径流, 增强降雨的叠加入渗能力, 降低土壤侵蚀^[32-33]。因此, 种草和鱼鳞坑措施处理坡面可以打破侵蚀速率与径流率的一般关系, 改变坡面水沙关系。

3 结 论

采用野外模拟降雨的方法, 以神府矿区不同类型弃土弃渣体为研究对象, 研究1.0和1.5 mm min⁻¹雨强条件下种草和鱼鳞坑措施对弃土弃渣堆积体坡面径流率、侵蚀速率及水沙关系的影响。不同措施下3种弃渣体边坡径流率均在产流6~9 min后趋于稳定, 产流过程中弃渣体边坡侵蚀速率均呈波动减小趋势, 且未防护坡面减小趋势较防护更明显; 种草对3种弃渣体的减水和减沙效益分别为10.33%~55.20%和7.80%~97.95%; 鱼鳞坑分别为21.32%~72.72%和39.50%~99.30%。鱼鳞坑措施对偏土质弃渣体的防护效益优于种草措施, 而种草措施对偏石质弃渣体和煤矸石的防护效益优于鱼鳞坑措施。未防护条件下3种弃渣体坡面的侵蚀速

率与径流率呈现显著的线性关系 ($p < 0.05$), 而种草和鱼鳞坑措施改变了坡面水沙关系; 尽管煤矸石堆积体在 1.0 mm min^{-1} 雨强下坡面无径流产生, 但考虑到生态安全, 进行相关的生态修复是十分必要的。本试验未进行更多坡度、更大雨强及更长历时的试验, 且措施种类也比较单一, 研究中也未考虑到壤中流的变化对土壤侵蚀的影响, 今后应加强这几个方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 杨选民, 丁长印. 神府东胜矿区生态环境问题及对策. 能源环境保护, 2000, 14 (1): 69—72
Yang X M, Ding C Y. Ecological environmental problems and countermeasures in ShenfuDongsheng mining area (In Chinese). Energy Environmental Protection, 2000, 14 (1): 69—72
- [2] 徐占军, 侯湖平, 张绍良, 等. 采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响. 农业工程学报, 2012, 28 (5): 232—240
Xu Z J, Hou H P, Zhang S L, et al. Effects of mining activity and climatic change on ecological losses in coal mining areas (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (5): 232—240
- [3] Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Changes in ecosystem carbon pool and soil CO_2 flux following post-mine reclamation in dry tropical environment, India. Science of the Total Environment, 2017, 583 (1): 153—162
- [4] Chalupnik S, Wysocka M, Janson E, et al. Long term changes in the concentration of radium in discharge waters of coal mines and Upper Silesian rivers. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 171 (2): 117—123
- [5] 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 spoil bank under simulated rainfall condition (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (3): 1—8, 76
- [6] 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, 23 (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, 23 (3): 78—82
- [7] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia. Applied Geography, 1995, 15 (4): 309—323
- [8] Zhou W, Yang K, Bai Z, et al. The development of topsoil properties under different reclaimed land uses in the Pingshuo opencast coalmine of Loess Plateau of China. Ecological Engineering, 2017, 100: 237—245
- [9] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验. 水科学进展, 2016, 27 (2): 256—265
Kang H L, Wang W L, Xue Z D, et al. Experimental study on runoff and sediment yield from engineering deposition with gravel in the northern windy-sandy region, Shaanxi (In Chinese). Advances in Water Science, 2016, 27 (2): 256—265
- [10] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测. 土壤学报, 2015, 52 (5): 1044—1057
Guo M M, Wang W L, Li J M, et al. Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coal field and prediction (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (5): 1044—1057
- [11] 王贞. 神东煤田不同下垫面侵蚀产沙规律及水动力参数特征. 陕西: 西北农林科技大学, 2011
Wang Z. The feature of sediment yield and hydrodynamics of different underlying surfaces in the construction of the Shenfu—Dongsheng coalfield (In Chinese). Shaanxi: Northwest A&F University, 2011
- [12] 田野. 堆渣边坡两种护坡措施的水土保持效益研究. 北京: 北京林业大学, 2015
Tian Y. Study on benefits of soil and water conservation slag heap slope revetment two measures (In Chinese). Beijing: Beijing Forestry University, 2015
- [13] 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. 中国水土保持科学, 2010, 8 (6): 69—74
Wang Z, Wang W L, Jin J, et al. Comparison of runoff generation, sediment yield and hydrodynamic parameters on the undisturbed and the disturbed land surface in the Shenfu-Dongsheng coalfield (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8 (6): 69—74
- [14] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响. 土壤学报, 2014, 51 (5): 983—992
Guo M M, Wang W L, Li J M, et al. The influence

- of soil particles fractal and rainfall on runoff and sediment yield in Shenfu coalfield (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 983—992
- [15] 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
- [16] 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究. *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
- [17] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程. *农业工程学报*, 2013, 29 (24): 94—102
Zhang L T, Gao Z L, Tian H W. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (24): 94—102
- [18] 刘瑞顺, 王文龙, 廖超英, 等. 露天煤矿排土场边坡防护措施减水减沙效益分析. *西北林学院学报*, 2014 (4): 59—64
Liu R S, Wang W L, Liao C Y, et al. Benefits in runoff and sediment reductions of the protection methods for the dump slope of opencast coal mine (In Chinese). *Journal of Northwest Forestry University*, 2014 (4): 59—64
- [19] 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
- [20] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法. *土壤学报*, 2002, 39 (6): 788—793
Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Analytic method for determination of detachment rate of concentrated flow in erosion rills (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (6): 788—793
- [21] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展. *水土保持学报*, 2005, 19 (1): 171—175
Fu S H. Effect of soil containing rock fragment on infiltration (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (1): 171—175
- [22] Wang J, Li X, Bai Z, et al. The effects of coal gangue and fly ash on the hydraulic properties and water content distribution in reconstructed soil profiles of coal-mined land with a high groundwater table. *Hydrological Processes*, 2017, 31: 687—697
- [23] 勾立新. 煤矸石的环境问题及对策初探. *铁法科技*, 2015, B12: 208—211
Gou L X. Environment problem and discussion on the countermeasures of coal gangue (In Chinese). *Science and Technology of Iron Processes*, 2015, B12: 208—211
- [24] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究. *中国农业大学学报*, 1996, 1 (2): 31—38
Yang Y C, Mo Y J, Wang Z F, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite (In Chinese). *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1 (2): 31—38
- [25] 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
- [26] Wilcox B P, Wood M K. Factors influencing interrill erosion from semiarid slopes in New Mexico *Journal of Range Management*, 1989, 42 (1): 66—70
- [27] 李建明, 王文龙, 王贞, 等. 神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验. *应用生态学报*, 2013, 24 (12): 3537—3545
Li J M, Wang W L, Wang Z, et al. A field experiment of runoff and sediment yielding processes from residues in Shenfu-Dongsheng coalfield (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (12): 3537—3545
- [28] 曾亮, 袁庆华, 王方, 等. 冰草属植物种质资源遗传多样性的ISSR分析. *草业学报*, 2013, 22 (1): 260—267
Zeng L, Yuan Q H, Wang F, et al. Genetic diversity analysis of *Agropyron* germplasm resource by ISSR (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22 (1): 260—267
- [29] Rpe M, McIntyre K, Vickers AW, et al. A rainfall simulation study of soil erosion rangeland in Swaziland.

- Soil Technology, 1997, 11 (3): 291—299
- [30] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响. 中国水土保持科学, 2005, 3 (2): 97—101
Wu F Q, Fan W B. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3 (2): 97—101
- [31] 杨胜利, 王云鹏. 排土场稳定性影响因素分析. 露天采矿技术, 2009 (3): 4—7
Yang S L, Wang Y P. Analysis of factors affecting dump stability (In Chinese). Opencast Mining Technology, 2009 (3): 4—7
- [32] 李虹辰, 赵西宁, 高晓东, 等. 鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响. 应用生态学报, 2014, 25 (8): 2297—2303
- Li H C, Zhao X N, Gao X D, et al. Effects of scale-like pit and mulching measures on soil moisture of dryland jujube orchard in North Shaanxi Province, China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (8): 2297—2303
- [33] 张北赢, 徐学选, 刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水土保持措施条件下土壤水分状况. 农业工程学报, 2009, 25 (4): 54—58
Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z. Soil water condition under different measures of soil and water conservation in loess hilly and gully region (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (4): 54—58

Study on Runoff and Sediment Reducing Effects of Erosion Control Measures on Slopes of Slag Dumps with Simulated Rainfall

YANG Bo¹ WANG Wenlong^{1, 2, 3†} GUO Mingming¹ KANG Hongliang¹ BAI Yun³ LI Jianming⁴

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on 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 Ecological Restoration of Mining Area in Northern Shaanxi Province; Yulin University; Yulin, Shaanxi 719000, China)

(4 Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract 【Objective】 The ecological and environmental problems caused by mining, especially coal mining, have aroused worldwide concerns and attention. It is, therefore, essential to explore rapid and effective ways to rehabilitate the ecological systems in the mining areas. 【Method】 Outdoor simulation of rainfall events was conducted with rainfall intensity controlled at 1.0 mm min⁻¹ or 1.5 mm min⁻¹ on slopes, different in texture, 1) earthy slope (more soil than rock); 2) rocky slope (more rock than soil); and 3) slope of gangue, to evaluate effects of the erosion control measures, planting grass and digging fish-scale pit. The two years old grass of *Agropyron* was formerly planted in the farmlands around the mining and transplanted on the slopes and the fish-scale pits dug temporarily. The rainfall simulator was a trough-type artificial simulator. When the nozzle is 3 m above the ground, the raindrops may reach the end point speed. Plots of the artificial slopes were 3 m × 1 each in area and 35° in slope gradient. Before the start of the experiment, rainfall was calibrated in intensity until it reached 85% or higher in uniformity coefficient. During the rainfall events, runoff flow velocity was measured with the dye tracing method. During the first 3 minutes of rainfall, samples of runoff and sediment were gathered every minute, and after that once every 3 minutes. Sediment samples were oven-dried for weighing. 【Result】 (1) Runoff leveled off in rate in 6 minutes after the initiation of runoff on all the three types of slopes, regardless of type of control measure. The erosion rate on the slope of gangue tended to fluctuate, while declining and the trend was more obvious than those on the protected slopes. (2) Planting grass reduced runoff by 42.91% ~ 51.21%, 26.28% ~ 55.20% and 10.33% and

sediment by 97.54% ~ 97.95%, 41.87% ~ 42.26% and 7.80%, respectively, on earthy slopes, rocky slopes and slopes of gangue, while digging fish-scale pits did by 51.89% ~ 72.72%, 22.37% ~ 42.92% and 21.32% and by 98.41% ~ 99.30%, 94.90% ~ 91.84% and 39.50%, respectively. (3) On earthy slopes, digging fish-scale pits was 8.98% ~ 21.51% and 0.46% ~ 1.76%, respectively, higher in runoff and sediment reduction rate than planting grass, while on rocky slopes and slopes of gangue, planting grass was 3.91% ~ 12.28% and 0.28% ~ 3.06% higher and 10.99% and 31.70% higher, respectively. (4) On all the three types of slopes without protection measures taken, linear relationships ($R^2 = 0.775$, $p < 0.01$; $R^2 = 0.649$, $p < 0.01$; $R^2 = 0.450$, $p < 0.05$) were found between erosion rate and runoff rate, but they were weakened or fading out altered when the protection measures were taken. **【Conclusion】** All findings in this study may serve as scientific basis in guiding ecological restoration of slopes of gangue in the mining area.

Key words Shenfu coalfield; Mining slags; Fish-scale pit; Grass planting; Runoff rate; Erosion rate

(责任编辑: 檀满枝)