

DOI: 10.11766/trxb201806260346

矿区排土场边坡不同植被配置模式的控蚀效益研究*

杨波¹ 王文龙^{1, 2†} 郭明明¹ 康宏亮¹ 刘春春³
陈卓鑫¹ 王文鑫¹ 赵满¹

(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 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要 为研究不同植被配置模式对露天煤矿排土场边坡径流产沙的影响。以内蒙古永利煤矿恢复 4 a 的排土场边坡为研究对象, 采用原位放水冲刷试验方法。以裸坡 (BS) 为对照, 研究了递增型放水流量 (5-10-15-20 L·min⁻¹) 条件下内蒙古永利煤矿排土场边坡不同植被配置模式 (上坡冰草 (面积占比 30%) + 下坡沙蒿 (70%), C3H7; 上坡冰草 (70%) + 下坡沙蒿 (30%), C7H3; 冰草, QC; 冰草和沙棘混合配置, CG) 的减水减沙效益。结果表明: (1) 流量递增初期 (0~9 min), 径流率与侵蚀速率急剧增大, 后波动减小。随着放水流量的递增, 坡面径流率随产流历时的延长呈阶梯式增长, 相对于首次放水流量 (5 L·min⁻¹) 冲刷时, 流量增大至 10、15、20 L·min⁻¹ 防护坡面与未防护径流率差异缩小。侵蚀速率随放水流量的变化较径流率的变化趋势减小, 且后期较大流量下, 坡面侵蚀速率有下降趋势; (2) C3H7、C7H3、QC、CG 配置模式坡面的减水和减沙效益分别为 31.99%、18.72%、15.29%、34.36% 和 81.28%、87.29%、84.80%、58.73%。“冰草-沙棘 (CG)” 配置坡面和 “冰草-沙蒿 (C7H3)” 配置坡面分别具有最优的减水效益和减沙效益; (3) 坡面不同根系植被混合搭配时的减水减沙效益高于单一根系植被防护坡面, 直根系与须根系植被合理配置具有更好的防护效果; (4) 各坡面侵蚀速率和径流率呈极显著的幂函数 (BS、C3H7、QC、CG) 和线性 (C7H3) 关系。(5) 坡面各植被配置模式在该区能较好地抵御持续暴雨径流的冲刷袭击。研究结果可为矿区合理进行生态恢复提供依据。

关键词 植被配置模式; 排土场边坡; 原位放水冲刷; 径流率; 侵蚀速率; 减水减沙

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

神府东胜煤田的开采给当地带来了巨大的经济效益, 然而对生态环境也造成了大面积的破坏, 其中露天采煤对环境破坏尤为严重。研究表明矿区受损生态的岩土每年以 7 800 万 m³ 左右的速度被侵蚀和搬运^[1]。其中, 弃土弃渣体结构松散, 稳定性差, 坡面可蚀性可达天然坡面的 10 倍~100 倍, 侵蚀速率是撂荒地的 43.6 倍~239.2 倍^[2-3]; 排土场

边坡在突发性强降雨条件下易导致水土流失乃至泥石流、滑坡等自然灾害发生。

当前在国家实施生态文明建设的大背景下, 矿区的生态环境问题进一步被学者们所重视, 对于受损矿区生态恢复, 项元和等^[4]、张志权等^[5]认为任何的退化生态系统均是以植被恢复为前提的, 适宜的植被恢复措施能提高破损土壤的活性、养分等^[6-7]。

* 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501604)、国家自然科学基金项目 (40771127, 41761062) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0501604) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 40771127, 41761062)

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

作者简介: 杨波 (1993—), 男, 陕西商人, 硕士研究生, 主要从事生产建设项目土壤侵蚀与水土保持。E-mail: 584431911@qq.com

收稿日期: 2018-06-26; 收到修改稿日期: 2018-09-13; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-09-25

研究证明植被覆盖能够显著增加入渗并且减少地表径流和土壤侵蚀^[8-9]。但如果只依靠土壤和植被的自然恢复,植被自然演替到灌草和森林群落一般分别需要 15~30 a 和 100 a 甚至更长的时间^[10]。郭建英等^[11]通过对草原露天矿区排土场边坡观测研究得出在植被恢复初期,不合理的治理措施会造成边坡侵蚀量大于裸露地。因此,在矿区生态恢复过程中,对植被的选择显得尤为重要。研究表明人工种植冰草对矿区偏石质和煤矸石弃渣体的减水和减沙效益优于鱼鳞坑措施^[12]。在煤矿废弃排土场种植豆科牧草可提升土壤氮素营养促进植被生长^[5, 13-14]。Vogel^[15]通过对美国东部地区矿区复垦植被研究得出,该区适宜生长高羊茅、鸭茅、小糠草等禾本科植物。而刺槐和新疆杨可作为安太堡露天煤矿植被恢复的优良树种^[16]。对于砒砂岩矿区边坡,柠条和草地坡面的减流和减沙效果可达 35.31%~64.74%和 80.70%~91.78%^[17];通过植被恢复,矿区受损土壤氮磷钾等有机质含量显著增加,土壤理化性质进一步得以改善,土壤抗蚀性提高,进而减少水土流失^[18]。目前针对该区排土场边坡治理的植被恢复模式多为单一物种(沙棘、柠条、紫花苜蓿、冷蒿等),且多以直根系植物为主^[19-21]。然而不同的植被类型和根系结构有显著不同的减沙效益^[22-24],因此,不同植被类型和根系结构的合理搭配可能更有助于控制矿区排土场边坡水土流失,而目前针对不同植被配置模式对该区煤矿排土场边坡径流泥沙调控作用的研究还较为少见。此外,根据张汉雄^[25]、周佩华和王占礼^[26]、Tao 等^[27]研究表明,递增型降雨径流造成的土壤侵蚀较均一型、递减型和间歇型降雨类型更为严重。

鉴于此,本文通过野外原位小区放水冲刷的试验方法来模拟递增型降雨条件下,排土场汇流对边坡不同植被冰草、沙蒿、沙棘及其搭配措施坡面(冰草、上冰草下沙蒿,冰草沙棘混合)的减水减沙效益及水沙关系的影响,分析该矿区排土场最佳植被恢复措施以及植被的控蚀机理,验证各措施抵御暴雨径流侵蚀的能力,为该区采矿后期进一步改善和加快生态修复提供一定的参考和指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地点位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗准格

尔召镇的永利煤矿,试验地理位置为 39°41'52"N, 110°17'2"E。该区属于风蚀水蚀交错区,海拔 1 000~1 500 m,气候为半干旱大陆性气候,年均气温 6.2~7.2℃,年蒸发量 2 100~2 700 mm,年降雨量 379~500 mm,降雨多集中在 7—9 月,降雨量约占全年的 80%,常以暴雨形式发生。该区土壤多以母质为砒砂岩的栗钙土和风沙土为主,抗侵蚀能力差,生态环境十分脆弱。前期通过对晋陕蒙接壤地能源区 60 座煤矿的排土场、排矸场边坡调查发现,坡长在 5~12 m 的边坡占总边坡的 21.52%,坡度大于 35°的高陡边坡占总边坡数量的 35%,是较为常见的一种边坡。而永利煤矿由于其地理位置以及煤矿开采规模、排土场堆积面积等方面在该区属于具有代表性的典型矿区。其西棱台状排土场于 2012 年堆积而成,2013 年被当地政府作为受损生态系统恢复的示范基地,在该区展开了一系列生态恢复措施,如铺设草方格、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall) 秸秆覆盖以及撒播种植冰草(*Agropyron cristatum*(Linn.) Gaertn)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙打旺、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.) 等其他一些草被和藤本及灌木植被,截止到 2017 年,该区各类植被恢复年限为 4 a 年。综合考虑植被植株高度、盖度、均匀度相同且长势良好的植被。选择生长有冰草、沙蒿、沙棘植被及其不同配置模式的排土场坡面作为试验研究坡面,选取植被配置方式以及各配置样地土壤机械组成见表 1。

1.2 试验设计

依据前期 60 座煤矿调查数据,结合该排土场实际情况,本试验小区坡长定为长 8 m、宽 1 m,坡度为 38°。首先在选取的各坡面通过米尺量取长宽分别为 8 m×1 m 样方,利用铁锹在边界外围向下挖深 30 cm,将长 4.0 m、宽 0.3 m、厚度为 0.5 cm 的 PVC 板埋入地下不低于 25 cm 深。小区上部修成平台用以放置稳流槽,大小为 1.0 m×0.4 m×0.5 m,在稳流槽内部铺垫一层防渗塑料纸,在小区下方安置三角型钢制集流槽,在集流槽下方修建大小适中的接样池便于试验接取泥沙样,并清理小区内碎石以及枯枝杂物。小区修建完毕后设立警戒标志,放置 48 h 后测试边界修建的紧密度。试验水源为排土场放置的大型储水罐,利用型号为 WB20XH 汽油泵抽取储水罐中的水至紊流槽,用阀门来控制流量,安装电磁流量计(GY-LED)监测流量大小,小区模型如图 1 所示。

表 1 坡面配置要素和土壤颗粒组成

Table 1 Slope parameters and soil particle composition

类型 Type	植被名称 Plant name	植被盖度 Vegetation coverage/%	根系结构 Root system	植被类型 Vegetation types	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
BS	—	0	—	裸地	12.96	34.06	52.98
C3H7	冰草+沙蒿	91	须-直根系	草地	15.57	39.75	44.67
C7H3	冰草+沙蒿	91	须-直根系	草地	16.43	43.03	40.54
QC	冰草	91	须根系	草地	16.92	43.40	39.68
CG	冰草+沙棘	75	须+直根系	草灌	18.81	42.94	38.25

注：表中 BS 代表裸坡，C3H7 代表坡面上部生长冰草、下部生长沙蒿、面积比例约为 3 : 7 的小区坡面，C7H3 代表坡面上部生长冰草、下部生长沙蒿、面积比例约为 7 : 3 的小区坡面，QC 为全冰草坡面，CG 为冰草沙棘灌木混合坡面 Notes: In this table BS stands for bare slope; C3H7 for the plot with *Agropyron* planted in the upper part covering 30% of the slope and *Artemisia desertorum* in the lower part covering 30%; C7H3 for the plot with *Agropyron* planted in the upper part covering 70% of the slope and *Artemisia desertorum* in the upper part covering 30%; QC for the plot covered entirely by *Agropyron*; and CG for the plot plante with *Agropyron* and *Hippophae* in mixture

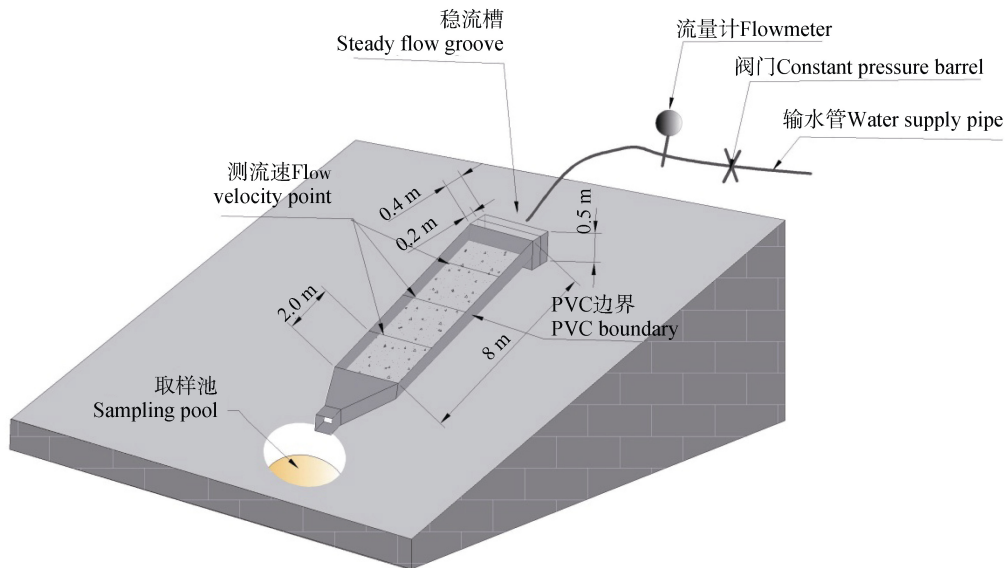


图 1 试验模型示意图

Fig. 1 Sketch of experimental model

根据张汉雄^[25]对黄土高原地区多年暴雨资料统计，大于 60 min、小于 180 min 的长历时暴雨频次占多年观测资料的 63.2%~86.5%，在该地较为常见，所以本试验递增型冲刷历时设计为 3 h，模拟 3~5 年一遇的暴雨标准；同时依据王占礼和焦菊英^[28]对黄土高原长历时侵蚀性暴雨的划分标准，降雨历时 5~240 min 对应的雨强为 0.88~0.08 mm·min⁻¹。该排土场汇水面积约为 300 m²，当地径流系数为 0.11，

所以本试验递增型流量设计为 5-10-15-20 L·min⁻¹，每种流量产流历时 45 min，实验重复 2 次。

1.3 试验过程与数据采集

试验前，对坡面进行洒水润湿，需保证各个坡面控制的含水量一致，试验开始时打开汽油泵，通过阀门和自动流量计将流量控制在初始放水流量状态。待水流稳定后将水管放入稳流槽，在水进入稳流槽消能后通过防渗塑料纸使水保持贴壁流进入小

区坡面时按下秒表开始计时,待径流从急流槽出口流出时记录下此段过程时间,并重新开始计时,在测流断面采用高锰酸钾染色法和秒表测流速,取 4 个断面的平均值作为坡面流速,将所测流速乘以修正系数,层流为 0.52,过渡流和紊流为 0.75,从而得到较为理想的径流流速^[17]。在集流槽出口处用量筒接取泥沙样,同时记录接样时间并读数,用精度为 0.01g 的电子称称量径流泥沙样,前 6 min 每 1 min 用量筒接取一次泥沙样,以后每隔 3 min 接取一次,用塑料桶收集泥沙样,试验结束后,关掉阀门同时取出稳流槽中的水管停止供水。用温度计测量水温,烘箱保持 105℃ 恒温烘干泥沙样并用电子天平(精度 0.01g)称重。

1.4 数据计算与处理

侵蚀速率 T_S : 即坡面小区径流在单位时间内剥蚀土壤的质量,由式(1)计算:

$$T_S = 60 \frac{M_1}{t} \quad (1)$$

式中, T_S 为侵蚀速率, $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$; M_1 为接样时间 t 内的泥沙干重, g ; t 为接样时间, s 。

径流率 R_r : 坡面小区在单位时间内流失水的质量,采用式(2)计算:

$$R_r = 60 \frac{(M_0 - M_1)}{\rho t} \quad (2)$$

式中, R_r 为径流率, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; M_0 为接样时间 t 内的径流和泥沙总质量, g ; ρ 为水的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; t 为接样时间, s 。

减水效益 η_w : 有植被防护小区相对于裸坡小区蓄水能力的百分比,采用式(3)计算:

$$\eta_w = 1 - \frac{(Q + T_l \times 5 - q_l)}{(Q + T_c \times 5 - q_c)} \times 100\% \quad (3)$$

式中, η_w 为防护措施的减水效益, Q 为试验产流后总的放水流量, L ; T_l 为裸坡坡面的产流时间, min ; q_l 为裸坡坡面产生的总径流量, L ; T_c 为各植被配置坡面产流时间, min ; q_c 为各植被配置坡面产生的总径流量, L 。

减沙效益 $\eta_{沙}$: 有植被防护小区相对于裸坡小区

减少的泥沙质量的百分比,采用式(4)计算:

$$\eta_{沙} = \frac{(T_{sl} - T_{sc})}{T_{sl}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\eta_{沙}$ 为防护措施的减沙效益, T_{sl} 为裸坡的侵蚀泥沙质量, g ; T_{sc} 为植被防护坡面侵蚀泥沙质量, g 。

产流贡献率 ϕ_w : 试验中各阶段产生的径流量占总径流量的百分比,采用式(5)计算:

$$\phi_w = \frac{W_i}{W_{总}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, ϕ_w 为产流贡献率, W_i 为各阶段总的产流量, L ; i 表示试验的第 1 ($5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)、2 ($10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)、3 ($15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)、4 ($20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) 阶段; $W_{总}$ 为试验总的产流量, L 。

产沙贡献率 ϕ_S : 试验中各阶段产生的侵蚀泥沙质量占总侵蚀泥沙质量的百分比,采用式(6)计算:

$$\phi_S = \frac{S_i}{S_{总}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, ϕ_S 为产流贡献率, S_i 为各阶段总的产沙量, kg ; $S_{总}$ 为试验总的产沙量, kg 。

采用 Excel 2016 和 SPSS 17.0 进行数据统计分析,用 Origin 2016 进行图表绘制。

2 结 果

2.1 排土场边坡产流产沙过程

2.1.1 径流率随时间的变化 在递增型放水流量条件下边坡径流率随产流历时的变化过程如图 2 所示。随着放水流量的递增,坡面径流率随产流历时的延长呈阶梯式增长。各坡面径流率分别在 1.28~16.40、0.1~12.23、0.09~14.93、0.12~15.69 和 0.06~12.48 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间变化。流量由 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 递增至 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面瞬时径流率(图中 45~48 min、90~93 min、135~138 min)增大 2.20 倍、7.78 倍、6.48 倍、19.92 倍和 16.11 倍;由 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 递增至 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 各坡

面瞬时径流率增大 2.77 倍、1.97 倍、8.26 倍、1.99 倍和 1.96 倍；由 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 递增至 $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，瞬时径流率增大 1.43 倍、2.08 倍、1.13 倍、1.78 倍和 2.07 倍，可见首次流量递增时径流率变化最为明显。坡面在经历初始流量 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时（图 2 中箭头所示），C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面的径流率变化较为稳定，径流率均在 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下波动，各植被配置具有较好的防护作用，而 BS 坡面径流率明显大于其余 4 种植被防护坡面，且径流率随着产流历时的延

长呈“突增-下降-稳定”变化的趋势。由于坡面细小颗粒被冲刷时堵塞土壤表面空隙，从而短时间内使入渗减小，导致产流突然增大；当细颗粒逐渐被径流搬运后，下垫面结构变得松散，入渗能力变大导致径流率呈下降趋势；最后由于坡面细颗粒已被基本冲刷完毕，径流已在坡面形成稳定的流路，从而使径流率保持稳定变化。随着放水流量的递增，未防护坡面瞬时径流率反而小于其余植被配置坡面，即防护坡面与未防护坡面的差异性逐渐缩小。

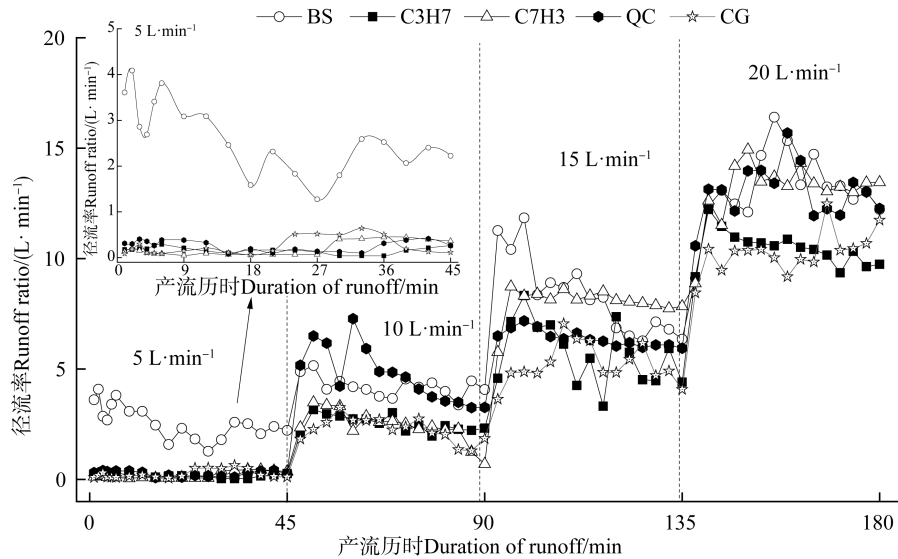


图 2 不同植被配置坡面径流率随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of soil runoff rate on the slope relative to pattern of the vegetation

2.1.2 侵蚀速率变化过程 递增型放水流量条件下各坡面侵蚀速率随产流历时的变化过程如图 3 所示。BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面侵蚀速率分别在 $419 \sim 9\ 775 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $11.35 \sim 1\ 717 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $3.34 \sim 1\ 537 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $1.97 \sim 1\ 789 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $4.17 \sim 3\ 258 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间变化。相对于径流率在递增型放水流量条下随产流时间的阶梯式增长，整体上侵蚀速率在流量递增阶段随产流时间的变化差异较小，坡面侵蚀速率仅在流量改变初期波动较大。各流量条件下未防护坡面（BS）侵蚀速率高于 4 种植被防护坡面，即植被配置坡面侵蚀量小于未防护的裸露坡面。流量由 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 递增至 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，由 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 递增至 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，由 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 递增至 $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面瞬时侵蚀速率（图中 45~48 min、90~93 min、135~138 min）增

大了 7.77~8.90 倍、4.15~38.09 倍、123.3~204.6 倍、57.98~75.67 倍和 2.73~199.5 倍。在流量突增阶段，瞬时侵蚀速率均为明显增大趋势。但侵蚀速率突增仅维持在流量改变初期的 9 min 以内，而后侵蚀速率表现为下降趋势，且部分坡面侵蚀速率低于前一个放水流量，整体上与径流率突增改变后依然保持大放水流量下大产流的趋势不同。坡面经初始 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 放水流量条件下（图 3 中箭头所示），未防护坡面侵蚀速率远高于 C3H7、C7H3、QC 和 CG 4 种植被配置坡面，且 BS 坡面侵蚀速率随产流时间的变幅大于 4 种不同植被配置的防护坡面。与径流率的变化情况一致，侵蚀速率随产流时间也为“突增-下降-稳定”的变化趋势，4 种植被防护坡面侵蚀速率变幅则较低，保持在 $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下变化，远低于未采取防护措施的裸露坡面。

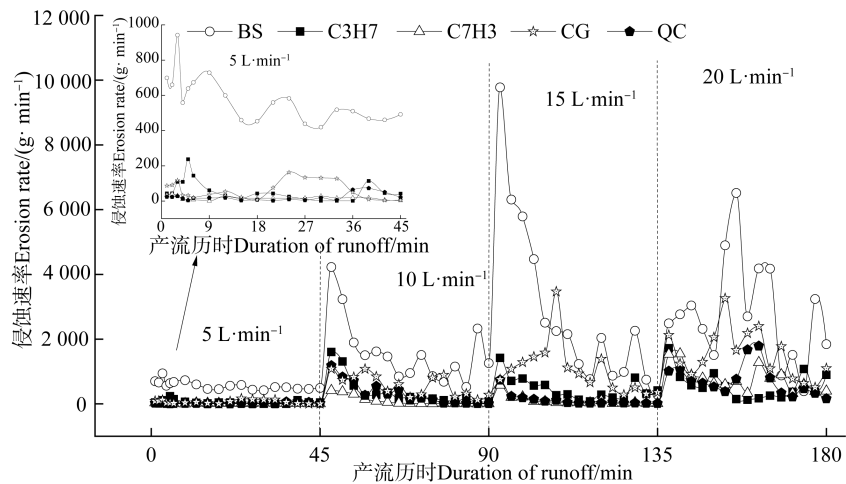


图 3 不同植被配置坡面侵蚀速率随时间的变化

Fig. 3 Temporal variation of soil erosion rate on the slope relative to pattern of the vegetation

2.2 不同植被配置模式对边坡的减水减沙效应

图 4 为递增型放水流量条件下各边坡累积产流量和累积产沙量统计情况。如图 4a 所示, BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面的累积径流量分别为 1 267、848.1、1 070、1 098、811.7 L。相较于裸坡, 两种不同类型根系的草本植被搭配 C3H7 和 C7H3 坡面的减水效益分别为 31.99% 和 18.72%, 单一根系植被 QC 坡面为 15.29%, 而冰草和沙棘混合配置 CG 坡面具有最好的减水效益, 为 34.36%; 流量由 5 L·min⁻¹ 递增至 20 L·min⁻¹ 时, BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面的产流贡献率分别为 9%~47%、1%~56%、1%~55%、1%~53% 和 1%~57%, 各流量对总产流的贡献率随放水流量的增大而增大; 图 4b 表明, BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面累积产沙量分别为 350.9、65.72、44.61、53.35 和 144.8 kg, 各植被防护坡面的减沙效益分别为 81.28%、87.29%、84.80% 和 58.73%, 其中 CG 配置坡面相对其他坡面减沙效益最低, 而 C7H3 配置坡面最高。4 种流量条件下各坡面的产沙贡献率分别为 7%~36%、3%~40%、2%~79%、2%~61% 和 2%~48%。随着流量的递增, 部分坡面的产沙贡献率有下降趋势, 即流量由 5 L·min⁻¹ 依次递增至 10、15、20 L·min⁻¹ 时, 坡面平均侵蚀速率和总侵蚀量表现为下降趋势。原因是当流量增大到一定条件时, 径流经过的坡面易蚀性细颗粒物质逐渐被侵蚀完毕, 导致径流的挟沙能力保持稳定, 当流量再次增大时, 坡面侵蚀细颗粒物质却远低于前次放水时坡面所保留的易蚀性

细颗粒, 进而出现流量增大产沙减小。

2.3 不同植被配置模式下的坡面水沙关系

图 5 为 BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面侵蚀速率和径流率的回归分析。BS、C3H7、QC 和 CG 坡面的侵蚀速率和径流率均呈极显著 ($R^2=0.522\sim 0.827$, $P<0.01$, $n=64$) 的幂函数关系, 而 C7H3 坡面侵蚀速率和径流率则为极显著的线性关系 ($R^2=0.447$, $P<0.01$, $n=64$)。说明, 当增加相同单位的径流率时, C7H3 坡面侵蚀速率增加值要低于其余 4 种坡面, 即坡面径流率增大的速率大于侵蚀量增大的速率, 同理可知, 增加相同单位的径流率时, BS 坡面增加侵蚀量的值远高于其他植被配置坡面, 进一步说明本研究中排土场坡面具有最好减沙效应的为须根系和直根系搭配 C7H3 配置坡面。由以上关系可知, 边坡无论有无植被措施防护, 侵蚀速率均随径流率的增大而增大, 坡面水沙情况表现为水大沙大的特征^[29-30], 由于植被的阻控效应, 即植被地上部分对降雨径流的拦截作用, 以及植被地下根系的固土和蓄水作用, 使坡面在放水流量相同时, 即各坡面径流率一致时, 植被坡面侵蚀量明显小于裸露坡面。

3 讨论

3.1 坡面水沙过程时空差异性

相对于 5 L·min⁻¹ 时, 流量依次递增至 10、15、20 L·min⁻¹ 时, BS 坡面与其余 4 种植被配置坡面径

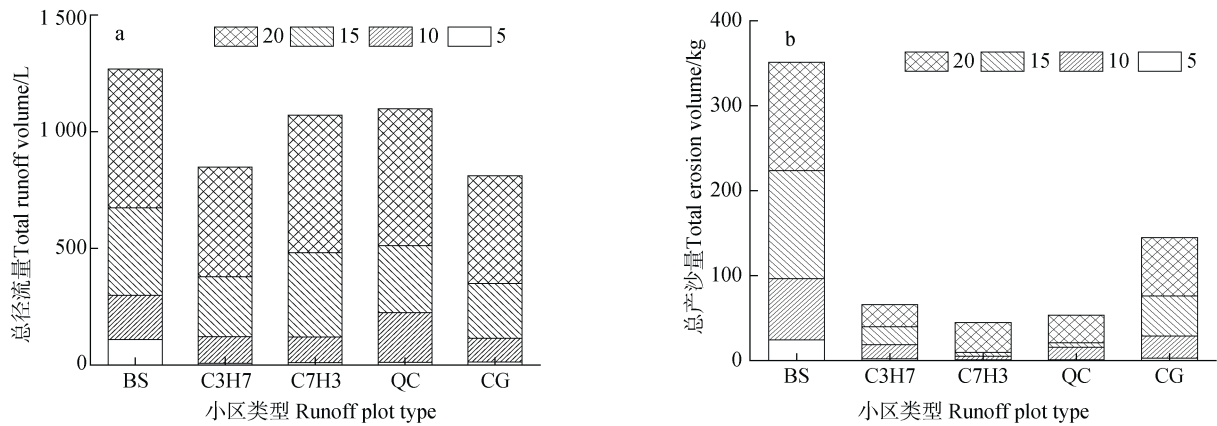


图 4 不同植被配置坡面总径流量和总侵蚀量

Fig. 4 Variation of total runoff volume and total erosion volume on the slope relative to pattern of the vegetation

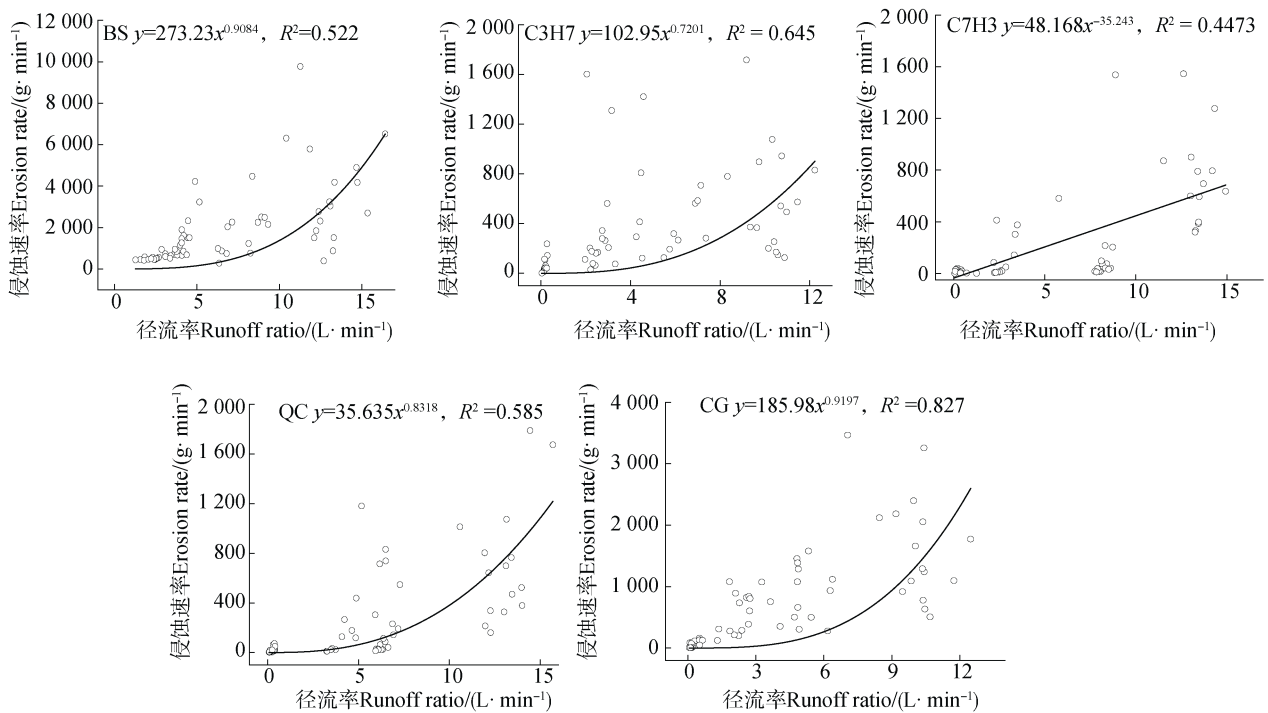


图 5 不同植被配置坡面侵蚀速率与径流率相关性

Fig. 5 Correlation between erosion rate and runoff rate on the slope relative to pattern of the vegetation

流率变化差异缩小。原因是由于同一种植被配置坡面在经过初始 $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 放水流量冲刷之后，坡面侵蚀沟已基本形成，即流路已经形成，待流量增长至 10 、 15 、 $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，由于重力作用，裸坡与植被配置坡面水流都会自然流入之前冲刷形成的沟道内向前流动。其次，由于经历了前期冲刷，土壤含水量已达饱和，水流下渗基本保持稳定，从而导致有植被防护坡面径流率变化与裸坡差异性缩小，而且流量越大此规律越明显；随产流历时变化，侵蚀速

率容易出现突增突减的峰值、谷值点，其中裸坡由于无植被防护此现象更为严重。主要是由于随着流量的递增，高陡边坡下径流更易汇集，下切作用更强，沟壁土体失稳形成崩塌体进入径流路径，阻滞水流运动和泥沙的输移，致侵蚀速率短暂降低，之后上方坡面径流继续快速汇集，待其抗剪强度不足以抵挡水流的冲刷时，崩塌体将被冲开并形成高浓度的固液二相体被搬运出坡面，然而沟壁崩塌与径流汇集冲刷不时交替进行，使得侵蚀过程为多峰多谷，

波动剧烈^[12, 31]。

3.2 不同配置模式坡面减水减沙机制

防护坡面减水效益从大到小依次为 CG>C3H7>C7H3>QC, 减沙效益从大到小为 C7H3>QC>C3H7>CG。这说明, (1) 试验条件下草灌 (CG) 恢复模式具有较好的减水效益, 但其减沙效益却相对较低。是由于冰草和沙棘所组成草灌坡面的特殊性, 本研究沙棘主要生长在上半坡, 而冰草主要分布在下半坡, 由于沙棘作为此坡面的优势种, 对于光照、水分以及土壤养分的吸收均大于冰草, 从而导致沙棘周围冰草生长较少, 即部分坡面变为无植被覆盖的裸露坡面, 同时沙棘属于主直根系型灌木, 在砒砂岩地区其根系垂直方向上一般可达 40 cm 深, 水平方向可达 137 cm, 远大于冰草和沙蒿草本植被根系的分布范围; 同时种植沙棘可增加土壤含水量和孔隙度, 具有平衡坡位对土壤水分的影响作用^[19, 32-33]。李鹏飞等^[34]对内蒙古矿区排土场不同植被林带的研究得出, 沙棘林的土壤孔隙度最大, 能蓄持较多水分, 因此在直根系沙棘和须根系冰草的共同作用下, 导致草灌坡面的蓄水效益要高于其他坡面。而另一方面, 由于部分坡面无植被覆盖, 当放水流量达到一定条件时, 裸露位置土壤含水量相对于具有植被防护位置处已经提前达到饱和, 在进一步放水的情况下, 裸坡位置由于没有植被根系的吸附牵拉, 易发生小型滑坡崩塌等较高含沙水流现象, 进而导致其产流量小而产沙量大。(2) 冰草坡面减水效益相对较低, 减沙效益却高达 84.80%。原因是冰草坡面相对于其他防护坡面生物结皮的覆盖度更大, 约为 50%~60%, 进而降低了其减水效益, 但却增加了减沙效益。已有研究表明^[35-37], 生物结皮, 特别是藻结皮可降低土壤水分渗透性, 增强表层土壤的抗蚀性, 因此, 导致冰草坡面径流较其他植被配置坡面增加, 而泥沙却较少。(3) 单从冰草不同配置模式进行减沙效益分析, 可知全为冰草坡面的减沙效益大于“冰草-沙蒿 3:7”配置坡面而小于“冰草-沙蒿 7:3”配置坡面, 即冰草和沙蒿在坡面搭配比例可能存在阈值, 本研究中二者上下比例为 7:3 时可为临界配置比例, 为该区最佳坡面防护配置措施。进一步分析可知, 降雨试验时植被的地上和地下部分均起蓄水拦沙作用, 但在径流冲刷试验时, 起防护作用的主要是植被的地下部分, 即植被的根系。而根系对

土体进行穿插、网络和固结作用, 使土壤入渗能力增加, 从而影响坡面产流产沙的过程^[38], 不同的根系, 蓄水拦沙效益不同。冰草为禾本科须根系植被, 沙蒿^[39]为菊科直根系植物, 表明二者的合理配置才能达到最佳防护效益^[24, 40]。

3.3 排土场防护措施适用性评价

在递增型放水流量条件下, 研究得出 C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面的减水和减沙效益为 15.29%~34.36%和 58.73%~87.29%。与苏涛等^[17]在矿区排土场研究得出冰草和沙棘的减水和减沙效益分别为 35.51%~75.57%和 80.70%~98.74%相比, 可以看出各措施减水效益相对于减沙效益均较低。同时研究发现, 未防护的裸坡在经历递增型放水流量冲刷下, 发育的侵蚀沟宽可达 70 cm, 深为 42 cm, 导致坡面损毁严重; 而 C3H7、C7H3、QC 和 CG 不同植被配置的坡面在经历 4 种递增型放水流量冲刷下, 除坡面有小的沟蚀发育外, 并未出现大的侵蚀沟以及滑坡、崩塌等较大规模侵蚀现象。因此, 坡面 4 不同植被的配置模式具有较好的防护能力, 能抵御较大连续暴雨径流的冲刷。然而在矿区坡面防护工程中, 对径流的消减和拦蓄是防治排土场侵蚀的关键, 尽管种植植被可对排土场水土流失起到较好的防护作用, 但上方汇水的流入同样还会造成一定的侵蚀发生, 尤其是水的流失还较为严重, 植被防护还未达到理想的效果, 因此在排土场坡面的治理过程中除在坡面配置不同植被进行防护外, 还应在坡顶修建拦水埂和边坡蓄排水措施, 以进一步增加对降雨径流的调控作用, 从而降低径流挟沙能力, 减少坡面土壤侵蚀。

4 结 论

采用原位放水冲刷的试验方法, 以内蒙古永利煤矿植被恢复 4 a 的排土场边坡为对象, 研究递增型 (5-10-15-20 L·min⁻¹) 放水冲刷条件下 BS、C3H7、C7H3、QC 和 CG 坡面的产流产沙规律和水沙关系以及 4 种植被配置措施坡面的减水减沙效益。流量递增初期 (0~9 min), 径流率与侵蚀速率急剧增大, 后波动减小, 随着放水流量的递增, 坡面径流率随产流历时的延长呈阶梯式增长。侵蚀速率随放水流量的变化较径流率的变化趋势小, 且后期较大流量

下, 坡面侵蚀速率有下降趋势; C3H7、C7H3、QC、CG 坡面的累积减水和减沙效益分别为 31.99%、18.72%、15.29%、34.36%和 81.28%、87.29%、84.80%、58.73%。CG 和 C7H3 配置模式分别具有最优的减水和减沙效益; 坡面不同根系植被混合搭配时的减水减沙效益高于单一根系植被防护坡面, 直根系与须根系植被合理配置具有更好的防护效果; 各坡面侵蚀速率和径流率呈极显著的幂函数 (BS、C3H7、QC、CG) 和线性 (C7H3) 关系。各植被配置模式在该区能较好地抵御持续暴雨径流的冲刷袭击。本试验未对各防护植被进行更深层次的分析, 今后应加强对根系密度扫描以及根系分布情况进行细致研究, 以及更多须根系和直根系植被配置比例和不同植被盖度、水分入渗以及其他雨型和模拟降雨下的相关试验工作。

参 考 文 献

- [1] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例. 生态学报, 1999, 19 (6): 870—875
Bai Z K, Zhao J K, Li J C, et al. Ecosystem damage in a large opencast coal mine A case study on Pingshuo Surface Coal Mine, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (6): 870—875
- [2] 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
- [3] 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 coalfield and prediction (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 1044—1057
- [4] 项元和, 李国萍, 于晓杰. 现代露天矿排土场生态修复与植被重建技术研究. 中国水土保持学会规划设计专业委员会 2009 年年会暨学术研讨会论文集. 2009
Xiang Y H, Li G P, Yu X J. Study on ecological restoration and vegetation rehabilitation technology of dumping site in modern opencast mine (In Chinese). *Proceedings of 2009 Annual Conference and Academic Symposium of Planning and Design Committee of China Soil and Water Conservation Society*. 2009
- [5] 张志权, 束文圣, 廖文波. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复. 生态学杂志, 2002, 21 (2): 47—52
Zhang Z Q, Shu W S, Liao W B. Role of legume species in revegetation of mined wastelands (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21 (2): 47—52
- [6] 黄元仿, 张世文, 张立平, 等. 露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展. 农业机械学报, 2015, 46 (8): 72—82
Huang Y F, Zhang S W, Zhang L P, et al. Research progress on conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of Opencast Coal Mine (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46 (8): 72—82
- [7] 孟红旗, 熊仁鹏, 王崇, 等. 采煤沉陷区不同土地利用类型土壤水分、有机质和质地的空间变异性. 土壤学报, 2018, 55 (4): 911—912
Meng H Q, Xiong R P, Wang C, et al. Spatial variability of soil moisture, organic matter content and soil texture in coal mining subsidence area as affected by land use (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 911—912
- [8] Cerda A. Parent material and vegetation affect soil erosion in Eastern Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (2): 362—368
- [9] 李毅, 邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究. 农业工程学报, 2007, 23 (3): 18—23
Li Y, Shao M A. Experimental study on influence factors of rainfall and infiltration under artificial grassland coverage (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23 (3): 18—23
- [10] Lovich J E, Bainbridge D. Anthropogenic degradation of the Southern California Desert Ecosystem and prospects for natural recovery and restoration. *Environmental Management*, 1999, 24 (3): 309—326
- [11] 郭建英, 何京丽, 李锦荣, 等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果. 农业工程学报, 2015, 31 (3): 296—303
Guo J Y, He J L, Li J R, et al. Effects of different measures on water erosion control of dump slope at opencast coal mine in typical steppe (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (3): 296—303
- [12] 杨波, 王文龙, 郭明明, 等. 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. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1357—1368
Yang B, Wang W L, Guo M M, et al. Study on runoff and sediment reducing effects of erosion control measures on slopes of slag dumps with simulated rainfall (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1357—1368
- [13] Li S, Liber K. Influence of different revegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1314—1323
- [14] 王丽丽, 甄庆, 王颖, 等. 晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应研究. 土壤学报, 2018, 55 (6): 1525—1533

- Wang L L, Zhen Q, Wang Y, et al. Effect of soil amelioration on soil nutrients at mining dumps in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1525—1533
- [15] Vogel W G. A guide for revegetating coal minesoils in the eastern United States [North Eastern States (USA)]. National Technical Reports Library, 1981, 6 (12): 526—526
- [16] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究. *科技导报*, 2009, 27(17): 30—34
Li J C, Bai Z K, Chai S J, et al. Study on technology of land reclamation and ecological rehabilitation of waste land in Pingshuo Surface Mine (In Chinese). *Science & Technology Review*, 2009, 27 (17): 30—34
- [17] 苏涛, 张兴昌, 王仁君, 等. 植被覆盖对砒砂岩地区边坡侵蚀的减流减沙效益. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 98—101
Su T, Zhang X C, Wang R J, et al. Effect of vegetation coverage on slope runoff and sediment reduction in pisha sandstone region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3): 98—101
- [18] 王金满, 杨睿璇, 白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型. *农业工程学报*, 2012, 28 (14): 229—235
Wang J M, Yang R X, Bai Z K. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (14): 229—235
- [19] 党晓宏, 高永, 汪季, 等. 砒砂岩沟坡沙棘根系分布特征及其对林下土壤的改良作用. *中国水土保持科学*, 2012, 10 (4): 45—50
Dang X H, Gao Y, Wang J, et al. Characteristics of root distribution of *Hippophae rhamnoides* L. and its improving effect on the forest soil on the ditch slope of soft sandstone area (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10 (4): 45—50
- [20] 王尚义, 石瑛, 牛俊杰, 等. 煤矸石山不同植被恢复模式对土壤养分的影响——以山西省河东矿区 1 号煤矸石山为例. *地理学报*, 2013, 68 (3): 372—379
Wang S Y, Shi Y, Niu J J, et al. Influence of vegetation restoration models on soil nutrient of coal gangue pile—A case study of No.1 Coal Gangue Pile in Hedong, Shanxi (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (3): 372—379
- [21] 刘娜娜, 田秋英, 张文浩. 内蒙古典型草原优势种冷蒿和克氏针茅对土壤低磷环境适应策略的比较. *植物生态学报*, 2014, 38 (9): 905—915
Liu N N, Tian Q Y, Zhang W H. Comparison of adaptive strategies to phosphorus-deficient soil between dominant species *Artemisia frigida* and *Stipa krylovii* in typical steppe of Nei Mongol (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38 (9): 905—915
- [22] Baets S D, Poesen J, Knape A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32 (9): 1323—1345
- [23] Baets S D, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 2008, 305: 207—226
- [24] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of top soils during concentrated flow in hilly Loess Plateau. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25 (6): 757—764
- [25] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律. *地理学报*, 1983, 38 (4): 93—102
Zhang H X. The characteristic of hard rain and its distribution over Loess Plateau (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1983, 38 (4): 93—102
- [26] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究. *水土保持学报*, 1992, 6 (3): 1—5
Zhou P H, Wang Z L. A study on rainstorm causing soil erosion in the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6 (3): 1—5
- [27] Tao W H, Wu J H, Wang Q J. Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions. *Scientific Reports*, 2017, 7.44082. 10.1038/srep44082.
- [28] 王占礼, 焦菊英. 黄土高原长历时土壤侵蚀暴雨标准初探. *水土保持通报*, 1992, 12 (3): 25—28
Wang Z L, Jiao J Y. A preliminary discussion on the criterion of long duration rainstorm for soil erosion in the Loess Plateau (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12 (3): 25—28
- [29] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究. *水利学报*, 2011, 42 (2): 232—237
Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42 (2): 232—237
- [30] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究. *水土保持学报*, 2017, 31 (1): 1—4
Zhang J, Li Z B, Li P, et al. Experimental study on the process of runoff and sediment yield under moving rainfall (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (1): 1—4
- [31] 黄俊, 吴普特, 赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响. *农业工程学报*, 2010, 26 (10): 29—37
Huang J, Wu P T, Zhao X N. Impact of slope biological regulated measures on soil water infiltration (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (10): 29—37

- [32] 李国荣, 毛小青, 倪三川, 等. 浅析灌木与草本植物护坡效应. 草业科学, 2007, 24 (6): 86—89
Li G R, Mao X Q, Ni S C, et al. Brief analysis of the effect of slope protection by shrub-grass vegetation (In Chinese). Pratacultural Science, 2007, 24 (6): 86—89
- [33] 陈云明, 刘国彬, 侯喜录. 黄土丘陵半干旱区人工沙棘林水土保持和土壤水分生态效益分析. 应用生态学报, 2002, 13 (11): 1389—1393
Chen Y M, Liu G B, Hou X L. Ecological benefits of artificial seabuckthorn stands in semi-arid hilly region of Loess Plateau on soil and water conservation and soil moisture (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (11): 1389—1393
- [34] 李鹏飞, 张兴昌, 朱首军, 等. 植被恢复对黑岱沟矿区排土场土壤性质的影响. 水土保持通报, 2015, 35 (5): 64—70
Li P F, Zhang X C, Zhu S J, et al. Effects of vegetation restoration on soil properties in Heidaigou mine dump (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (5): 64—70
- [35] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响. 应用生态学报, 2013, 24 (1): 105—112
Gao L Q, Zhao Y G, Qin N Q, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (1): 105—112
- [36] Belnap J. Soil surface disturbances in cold deserts: Effects on nitrogenase activity in cyanobacterial-lichen soil crusts. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23: 362—367
- [37] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报. 应用生态学报, 2006, 17 (8): 1429—1434
Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J, et al. Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (8): 1429—1434
- [38] Rpc M, Mcintyre K, Vickers A W, et al. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technology*, 1997, 11 (3): 291—299
- [39] 马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等. 乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征. 生态学报, 2012, 32 (11): 3423—3431
Ma Q L, Zheng Q Z, Jia J J, et al. Quantitative characteristics and species composition of *Artemisia sphaerocephala* and *A. ordosica* communities in the Ulanbuh Desert (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (11): 3423—3431
- [40] 王玉霞, 刘国彬, 王国梁, 等. 茵陈蒿群落分布格局对坡面产流产沙的影响. 水土保持研究, 2010, 17 (1): 62—66
Wang Y X, Liu G B, Wang G L, et al. Effect of artemisia capillaries distribution patterns on runoff and sediment production in Loess Hilly and Gully Region (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17 (1): 62—66

Erosion-controlling Effects of Revegetation on Slope of Refuse Dump in Mining Area Relative to Vegetation Pattern

YANG Bo¹ WANG Wenlong^{1,2†} GUO Mingming¹ KANG Hongliang¹ LIU Chunchun³ CHEN Zhuoxin¹
WANG Wenxin¹ ZHAO Man¹

(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 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract 【Objective】 In order to study effects of revegetation varying in pattern controlling runoff and sediment yield on slopes of refuse dumps in opencast coal mining fields, a field experiment was conducted on the slope of a refuse dump in the Yongli Coal Mining Area, Inner Mongolia. 【Method】 Five plots different in vegetation pattern were selected on the slope that had been revegetated for four years for the experiment using in-site scouring method. The five plots included Plot C3H7 (*Agropyron* planted on the upper slope accounting for 30% in area plus *Artemisia desertorum* on the lower slope accounting for 70% in area), Plot C7H3 (*Agropyron* planted on the upper slope accounting for 70% in area plus *Artemisia desertorum* on the lower slope accounting for 30% in area), Plot QC (*Agropyron* planted on the whole slope), Plot CG (*Agropyron* mixed with *Artemisia desertorum* in plantation)

and Plot BS (Bare slope) as control, all being 8×1 m in area and 38° in slope gradient. Water flowed down on the top of the slopes or plots at a gradually increasing rate (5-10-15-20 L·min⁻¹). During the flow scouring events, runoff flow velocity was monitored with the dye tracing method. In the first 6 minutes of runoff, samples of runoff were collected once every minute, and afterwards once every 3 minutes for analysis of sediment content, using the oven-drying and weighing method. 【Result】 (1) At the initial stage of the increase (0~9 min) in flow rate, runoff rate and erosion rate increased sharply, and follow-up-fluctuation decreased. When the flow increased, runoff rate on the slope increased stepwise with the duration of runoff prolonging. Compared to the initial flow at a rate (5 L·min⁻¹), the flow increasing to 10, 15 and 20 L·min⁻¹ made the difference in runoff rate between protected surface and unprotected surface narrower. Meanwhile, the variation of erosion rate with the variation of flow rate was lower in magnitude than that of the variation of runoff rate, and the erosion rate tended to decline in the late phase of the scouring test even when the flow rate was quite high; (2) In Plot C3H7, C7H3, QC and CG, runoff was reduced by 31.99%, 18.72%, 15.29% and 34.36% and sediment was by 81.28%, 87.29%, 84.80% and 58.73%. Plot CG (mixed *Agropyron-Hippophae*) and C7H3 (70% *Agropyron Hippophae* – 30% *Artemisia desertorum*) was obviously the most effective pattern of vegetation for controlling runoff and sediment yield, respectively; (3) *Agropyron Hippophae* and *Artemisia desertorum* are different in root system, i.e. taproot system and fibrous root system. The vegetation formed of or properly arranged with mixed plants different in root system has better soil and water conserving effects than the one formed of only a type of plant does; (4) In all the slopes, regardless of vegetation pattern, erosion rate and runoff rate formed an extremely significant power function and linear (C7H3) relationship. And (5) Vegetations of all patterns in this experiment had certain functions to resist scouring erosion caused by continuous heavy storms. 【Conclusion】 All the findings in this experiment may serve as scientific a basis for reasonable ecological restoration in the mining area.

Key words Vegetation pattern; Dump slope; In-situ flow scouring; Runoff rate; Erosion rate; Runoff and sediment reduction

(责任编辑: 檀满枝)