

# 干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益

薛东明, 郭小平, 张晓霞

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探究不同生态修复模式对露天矿区排土场边坡产流产沙规律的影响, 采用野外径流小区试验方法, 对矿区排土场边坡不同生态修复模式的产流产沙进行了 1 个雨季连续观测。结果表明: (1) 研究区降雨年内分配不均, 主要集中在汛期 7—9 月, 该时期降雨量占到年均降雨量的 77.03%, 是年内径流泥沙损失最多的时期。(2) 不同生态修复模式与对照(只撒播灌草种子)相比均具有减流减沙效果, 但是不同生态修复模式的减流减沙效益有显著差异, 减流效果从大到小依次为沙柳网格模式(64.35%)>生态棒模式(56.56%)>生态袋模式(52.74%)>铁丝石笼模式(48.70%)>植物篱模式(45.51%)>土壤改良模式(35.89%)>无纺布覆盖模式(33.97%)>砾石压盖模式(8.19%); 减沙效果依次为沙柳网格模式(69.41%)>生态棒模式(61.28%)>生态袋模式(55.09%)>铁丝石笼模式(52.43%)>植物篱模式(48.72%)>土壤改良模式(42.09%)>无纺布覆盖模式(38.31%)>砾石压盖模式(19.34%)。(3) 不同生态修复模式产沙量对产流量响应特征均呈极显著正相关( $P < 0.05, r > 0$ ), 沙柳网格模式产沙量对产流量响应程度较小, 生态棒模式次之, 对照产沙量对产流量响应程度最大。

**关键词:** 露天煤矿; 排土场边坡; 减流减沙效益; 生态修复模式

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2021)06-0015-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.003

## Runoff and Sediment Reduction Under Different Slope Ecological Restoration Modes of Waste Dump in Arid Mining Area

XUE Dongming, GUO Xiaoping, ZHANG Xiaoxia

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to explore the impact of different ecological restoration modes on the runoff and sediment production law of the dump in the opencast coal mine, according to the field runoff plot methods, the field standard runoff plot method was used to observe the runoff and sediment production of the dump in the mining area with different ecological restoration modes for a continuous rainy season. The results showed that: (1) The rainfall distribution in the study area is uneven during the year, mainly concentrated in the flood season from July to September, the rainfall in this period accounted for 77.03% of the average annual rainfall, which was the period with the largest loss of runoff and sediment in the year; (2) Compared with the bare slope (sowing only shrub and grass seeds), different ecological restoration modes had the effect of runoff and sediment reduction, but the benefits of different ecological restoration modes for runoff and sediment reduction were significantly different. Runoff reduction effect from large to small listed in the order of *Salix psammophila* checkerboard mode (64.35%) > Ecological rods mode (56.56%) > Ecological geo-textile bag mode (52.74%) > Wire gabion mode (48.70%) > Hedgerows mode (45.51%) > Soil improvement mode (35.89%) > Non-woven fabric covering mode (33.97%) > Gravel capping mode (8.19%); The sediment reduction effect were *Salix psammophila* checkerboard mode (69.41%) > Ecological rods mode (61.28%) > Ecological geo-textile bag mode (55.09%) > Wire gabion mode (52.43%) > Hedgerows mode (48.72%) > Soil improvement mode (42.09%) > Non-woven fabric covering mode (38.31%) > Gravel capping mode (19.34%); (3) The response characteristics of sediment yield from different ecological restoration modes were all significantly positively correlated ( $P < 0.05, r > 0$ ), the *Salix psammophila* checker board mode had a smaller response to

收稿日期: 2021-06-23

资助项目: 国家重点研发计划项目“矿区生态修复与生态安全保障技术集成示范研究”(2017YFC0504406); 内蒙古自治区科技重大项“内蒙古典型矿区差异化修复治理模式与解决方案研究”(2020ZD0021)

第一作者: 薛东明(1996—), 男, 陕西榆林人, 在读硕士生, 主要从事工程绿化和矿山修复研究。E-mail: dongmingxue@163.com  
通信作者: 郭小平(1962—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博导, 博士, 主要从事工程绿化和矿山修复研究。E-mail: guoxp@bjfu.edu.cn

runoff, followed by the Ecological rods mode, and the Rock cover mode had the greatest response to runoff.

**Keywords:** opencast coal mine; waste dump slope; runoff and sediment reduction benefit; ecological restoration mode

我国煤炭资源丰富,长期以来,煤炭资源在我国能源消费构成中占比达 70% 以上,在国民经济发展中具有重要的作用,而且在接下来很长的一段时间内,煤炭将继续作为我国的主体能源为我国的经济发展提供重要支撑作用<sup>[1]</sup>。煤田的开采给当地带来了巨大的经济和社会效益,同时对生态环境造成了大面积的破坏,尤其是因露天开采而堆积起来的排土场,是露天煤矿土壤侵蚀最严重的区域,在强降雨诱发作用下易导致裸露排土场边坡发生表层水土流失、滑坡和泥石流等地质灾害现象<sup>[2]</sup>,加剧矿区生态环境恶化。而我国煤炭资源主要集中在分布在西北干旱、半干旱荒漠区,内蒙古乌海市作为其代表之一,煤田面积达 403.5 km<sup>2</sup>,占土地面积的 23%<sup>[3-4]</sup>,研究该区露天煤矿排土场土壤侵蚀与工程示范对改善该区的生态环境具有重要的意义。

许多学者对露天矿排土场边坡水土流失防护措施进行了较为系统研究,史倩华等<sup>[5]</sup>、杨波等<sup>[2]</sup>采用野外放水冲刷试验方法,以内蒙古准格尔旗永利露天煤矿排土场边坡为研究对象,研究不同放水流量下排土场不同植被措施及配置模式对边坡径流产沙的影响;李宏伟等<sup>[6]</sup>采用野外人工模拟降雨试验对神府东胜煤田扰动地面的侵蚀产沙过程进行模拟,探讨其侵蚀产沙、产流特征;郭建英等<sup>[7]</sup>以典型草原露天煤矿的排土场边坡为研究对象,利用野外原位径流小区研究了不同治理措施下排土场边坡次降雨的产流、产沙规律,其结果表明,生态袋一字型治理措施(生物+工程措施)的减流阻沙效果较好,且生物与工程相结合的治理措施明显优于单纯的生物治理措施;花东文等<sup>[8]</sup>采用野外人工模拟降雨对安塞县马家沟的自然恢复草地、人工柠条林地和刺槐林地下的产流时间、径流率、产沙强度、产流产沙量的变化规律进行研究。以上研究多集中于植被对坡面的减流减沙效益方面,针对工程措施及工程措施+生物措施对露天矿排土场边坡的防蚀机理与功效方面的研究较少,且这些研究多以室内模拟降雨和原位放水冲刷试验为主,缺乏野外降雨条件下的实践验证,研究区多集中在我国黄土丘陵区 and 东部煤矿开发区,而对于西北干旱、半干旱荒漠区露天矿排土场边坡不同治理模式的土壤侵蚀过程及其机理的研究鲜有报道。鉴于此,本研究通过在乌海新星矿联合排土场边坡设置生态袋、植物篱、沙柳网格、铁丝石笼等 8 种生态修复模式和 1 个对照,研究不同模式下的边坡产流产沙规律,比较不同模式间的减流减沙效果,

探讨最适宜的生态修复模式,旨在为该区域矿区排土场水土流失预防与治理选择适合的治理模式,也为该区域矿山废弃地的生态修复提供科学数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概括

新星煤矿联合排土场位于内蒙古乌海市海勃湾区境内,该区域属于温带干旱半干旱大陆性气候,土壤侵蚀类型以风力侵蚀为主,兼有季节性的水力侵蚀。年均气温 9.64 °C,多年平均降水量 159.8 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 70% 以上,其他季节多为无效降雨,降水年际变化大、分配不均匀,多年平均蒸发量 3 289 mm,气候干旱。多年平均风速 3.1~4.7 m/s,最大瞬间风速高达 33.0 m/s。土壤类型主要为棕钙土、风沙土。植被多具耐旱性、抗风性,主要植物种为四合木(*Tetraena mongolica*)、霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等,植被稀疏,以灌—草结构为主要植物群落特征。

### 1.2 试验设计及观测方法

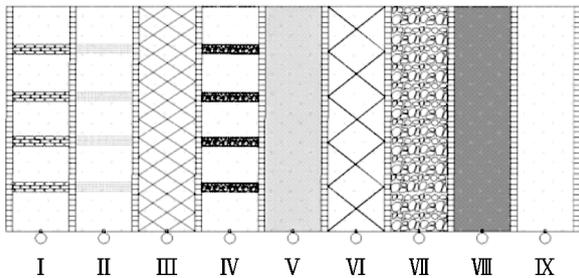
1.2.1 野外试验设计 将排土场边坡进行平整后,在该排土场第二阶共设 17 个标准径流小区,除对照外,其他坡面模式均布设 2 个进行重复观测,每个径流小区面积均为 100 m<sup>2</sup>(长 20 m,宽 5 m),坡度均为 39°,坡长均为 20 m,坡向呈西偏北方向。径流小区左右两侧采用彩钢板围挡,其中地下埋入 30 cm,外露 20 cm,上下端采用混凝土浇筑挡墙,在下端墙体前设置两边高、中间低的导流槽并接导流管,将水流引入小区下方的集流桶。集流槽上缘与坡面底部土壤高度保持一致,径流小区下方设有圆形集流桶和分流桶,以收集降雨产生的径流和泥沙。试验于 2020 年 6 月 1 日至 10 月 31 日在乌海市新星矿联合排土场进行观测。各模式小区以及对照均撒播灌草种子,包括柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、沙生冰草(*Agropyron desertorum* (Fisch.) Schult.)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng. Syst. Veg.)、苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.) 6 种植物种,混合比例为 2:1:2:2:2:1,撒播量均为 35 g/m<sup>2</sup>。生态袋模式由长 80 cm、宽 40 cm 的聚丙烯及一系列辅料复合加工而成的袋子装土后“品”字型水平紧密平铺而成;植物篱模式由预处理过的多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb)粗壮枝条按 10 cm×10 cm 的间距扦插于坡面,形成 5 m×1.5 m 的条带,存活率约 78.13%;沙柳网格模式是由 1 m×1 m 的沙

柳条围成的菱形网格,疏透度约 15%;铁丝石笼模式由大小约 25~35 cm 的砾石半埋于土体中,并用绞合的六边形镀锌铁丝网固定;土壤改良模式为将腐殖酸、保水剂、沸石、黑矾均匀掺入 0—25 cm 的土壤中;生态棒模式由直径约 20 cm 的聚丙烯及一系列辅料复合加工而

成的柱状袋装土后菱形锚固于坡面;砾石压盖模式由大小约 25~35 cm 的砾石半埋于整个坡面,砾石覆盖度约 85%左右;无纺布覆盖模式是撒播植物种子后用无纺布铺盖整个坡面,可自动降解。各径流小区基本情况及示意图见表 1 和图 1。

表 1 径流小区基本情况

类型编号	生态修复模式	布设方式	植被覆盖度/%
I	生态袋	自上而下等间距布设 4 排,间距 5 m,每排“品”字形水平平铺 3 行	43
II	植物篱	自上而下等间距布设 4 排,间距 5 m,每排规格 5 m×1.5 m	47
III	沙柳网格	自上而下布设 1 m×1 m 的网格,材料为沙柳,疏透度约 15%	56
IV	铁丝石笼	竖向间距 5 m,每组水平平铺坡面,石笼规格为 5 m×1.5 m,共 3 组	44
V	土壤改良	成分为腐殖酸、保水剂、沸石、黑矾,均匀掺入土壤 0—25 cm	46
VI	生态棒	竖向间距 4 m×4 m,菱形布设生态棒,共 5 组	52
VII	砾石压盖	砾石平铺整个坡面,外露 10 cm,埋深 25 cm	48
VIII	无纺布覆盖	植物播种后铺盖整个坡面	22
IX	对照	仅撒播灌草种子	12



注: I 为生态袋模式; II 为植物篱模式; III 为沙柳网格模式; IV 为铁丝石笼模式; V 为土壤改良模式; VI 为生态棒模式; VII 为砾石压盖模式; VIII 为无纺布覆盖模式; IX 为对照。

图 1 径流小区示意

1.2.2 观测方法 小区的观测内容主要包括降雨、产流及产沙等。利用位于试验小区附近的 Vantagepro2 型自动气象站进行降雨数据的采集。次降雨产流结束后,立即对径流泥沙进行观测和取样。通过用水尺量测集流桶或分流桶水位计算出径流小区的次产流量;产沙量分为 2 部分:一部分为集流桶或分流桶中浑水泥沙含量,另一部分为导流槽中沉积的泥沙。导流槽中的泥沙可直接收集烘干后称重,浑水泥沙含量则通过将浑水充分搅拌均匀后量取 1 000 mL 浑水样装入取样瓶,3 次重复,带回实验室进行测定(包括过滤、烘干、称重等步骤),再根据样品体积占次降雨产流量体积的比例推算出浑水中泥沙总量。导流槽泥沙量和浑水泥沙含量之和即为次降雨产沙量。每次观测、取样等工作结束后立即对导流槽和集(分)流桶进行清理以便下次继续观测。

通过对降雨、产流及产沙的观测,计算产流量、产沙量、减流效益、减沙效益等指标。

$$ER = \frac{Q_{bi} - Q_{mi}}{Q_{bi}} \quad (1)$$

$$ES = \frac{S_{bi} - S_{mi}}{S_{bi}} \quad (2)$$

式中:ER 为坡面减流效益(%);ES 为坡面减沙效益(%); $Q_{bi}$  和  $Q_{mi}$  分别为对照和生态修复模式的产流量(mL); $S_{bi}$  和  $S_{mi}$  分别为对照和生态修复模式的产沙量(g)。

1.2.3 数据处理及分析方法 使用 Excel 2019 进行数据整理,采用 IBM SPSS 26.0 软件进行统计分析,其中差异显著性采用 LSD(least signification difference test)进行样本检验;运用 Origin 2019 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨特征分析

研究区观测期间(2020 年 6 月 1 日至 10 月 31 日)共观测到 19 场降雨事件,其中使径流小区发生产流的降雨有 7 场,占降雨总场次的 36.84%;产流降雨总量为 165.7 mm,占全年总降雨量(215.1 mm)的 77.03%。通过将这 7 场降雨进行等级划分,可得到各等级雨量在产流降雨总量中的占比。根据气象部门国家标准《降水量等级》<sup>[9]</sup>的规定(小雨:24 h 降雨量 0~9.9 mm;中雨:24 h 降雨量 10~24.9 mm;大雨:24 h 降雨量 25~49.9 mm;暴雨:24 h 降雨量 50~99.9 mm),7 次产流的降雨事件中小雨、中雨、大雨、暴雨分别发生 2,3,1,1 次,分别占侵蚀性降雨场次和产流总降雨量的 28.57%,42.86%,14.29%,14.29%和 11.29%,28.36%,19.55%,40.8%(表 2)。由此可以看出,研究区降雨主要集中在 7—9 月,且以中雨为主,降雨场次占比最高,但暴雨的降雨量占比最高。汛期降雨是引起排土场坡面小区产流产沙的主要原因,该地区 7—9 月发生侵蚀性降雨的可能性极大,应加强该时期的水土保持工作。

### 2.2 不同修复模式对坡面产流的影响

通过对不同模式累积产流量进行差异分析得到,生态袋、植物篱、沙柳网格、铁丝石笼、土壤改良、生态棒、砾石压盖、无纺布覆盖、对照模式累积产流量分别

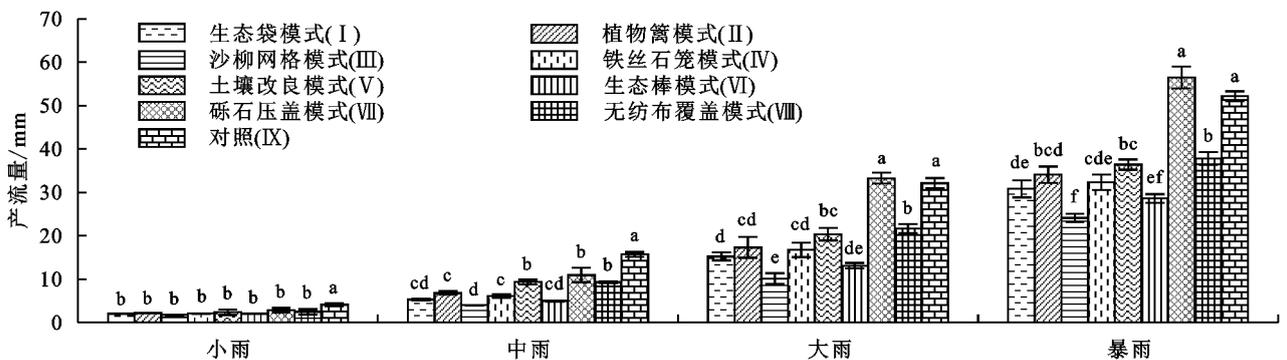
为 72.21, 76.09, 49.78, 71.63, 89.52, 60.66, 128.20, 92.21, 139.64 mm, 其中对照的累积产流量最大, 与其他生态修复模式差异显著 ( $P < 0.05$ )。8 种生态修复模式中, 沙柳网格模式的累积产流量最小, 为对照的 35.65%, 显著低于其他模式 ( $P < 0.05$ ), 说明该模式的减流作用最佳; 其次为生态棒模式, 为对照的 43.44%; 而砾石压盖模式的累积产流量最大, 为对照的 91.81%, 与其他 7 种生态修复模式的累积产流量存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 生态袋、植物篱、铁丝石笼模式间累积产流量无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。各模式累积产流量从大到小依次为 IX > VII > VIII > V > II > IV > I > VI > III。

表 2 侵蚀性降雨特征参数

降雨时间/ (年-月-日)	降雨 历时/min	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm · min <sup>-1</sup> )	降雨 等级
2020-07-07	273	9.8	0.036	小雨
2020-07-18	226	8.9	0.039	小雨
2020-07-24	188	19.3	0.103	中雨
2020-08-12	153	15.4	0.101	中雨
2020-08-23	325	32.4	0.100	大雨
2020-08-29	158	12.3	0.078	中雨
2020-09-28	162	67.6	0.417	暴雨

由图 2 可知, 随着降雨等级的增大, 不同生态修复模式下的产流量均有不同程度增大, 但各生态修复模式整体上不同程度地减小了产流量。小雨、中雨、大雨、暴雨等级下各生态修复模式与对照相比, 产流量分别减少 30.73%~56.95%, 30.33%~74.51%, -3.39%~68.54%, -8.18%~53.77%。不同修复

模式对坡面径流的控制作用不同, 不同降雨等级下, 各生态修复模式产流量存在较大差异。小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个降雨等级下各模式的减流效益呈现先增加后降低的趋势; 小雨等级下, 各生态修复模式的产流量均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 但不同生态修复模式之间累积产流量变化幅度小, 各生态修复模式间无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 这是因为降雨经过坡面模式的阻拦作用入渗消耗后, 转化成地表径流部分较小; 中雨等级下, 各生态修复模式的产流量均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 且各生态修复模式的整体减流效益达到最大, 其中沙柳网格模式的产流量最小, 显著低于除生态袋模式、生态棒模式外的其他模式 ( $P < 0.05$ ), 但它们间差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 而当降雨等级大于中雨时, 各模式的减流效益开始降低, 除砾石压盖模式外, 其他模式产流显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 其中沙柳网格模式产流最少 ( $P < 0.05$ )。总体而言, 在各降雨等级下, 沙柳模式的产流量均最小, 具有明显的截流能力。砾石压盖模式的减流效果最差, 其保水效果受降雨量的影响较大, 在大雨和暴雨等级下其减流效益分别为 -3.39% 和 -8.18%, 减流效果较对照差。同样, 生态袋、植物篱、沙柳网格、铁丝石笼等 8 种生态修复模式和对照在暴雨等级下的产流量是这些模式在其他降雨等级下产流总和的 1.00~1.52 倍, 远高于这些模式在其他降雨等级下产流量的总和, 是这些模式在中雨等级下产流量的 3.33~6.03 倍, 表明该地区对排土场边坡径流流失影响最严重的是偶尔出现的暴雨, 其次为大雨和引起坡面产流场次较多的中雨。



注: 图中不同字母表示各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

图 2 不同降雨等级下各生态修复模式产流特征

### 2.3 不同修复模式对坡面产沙的影响

通过对不同模式累积产沙量进行差异分析得到, 生态袋、植物篱、沙柳网格、铁丝石笼、土壤改良、生态棒、砾石压盖、无纺布覆盖、对照模式累积产沙量分别为 7 492.40, 8 555.09, 5 103.14, 7 936.22, 9 662.15, 6 459.80, 13 457.02, 10 292.60, 16 683.79 t/km<sup>2</sup>, 不同生态修复模式间的累积产沙量是对照的 30.59%~77.06%。8 种生态修复模式中, 沙柳网格模式的产

沙量最小, 为对照的 30.59%, 表现出明显的阻沙能力, 其次为生态棒模式, 为对照的 38.72%; 砾石压盖模式的产沙量最大, 为对照的 77.06%。8 种生态修复模式产沙量均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 其中, 沙柳网格模式坡面产沙量显著低于其他模式 ( $P < 0.05$ ), 各生态修复模式产沙量由大到小依次为 IX > VII > VIII > V > II > I > IV > VI > III。

由图 3 可知, 随着降雨等级的增大, 各生态修复

模式产沙量呈递增趋势。与对照相比,不同生态修复模式均不同程度地减小产沙量,但不同降雨等级下,各生态修复模式产沙量存在较大差异。小雨和中雨条件下,各生态修复模式产沙均显著低于对照( $P < 0.05$ ),其中小雨等级下,产沙量减少 41.27%~64.58%,这是因为小雨侵蚀力较弱,各小区土壤流失量都较小;中雨等级下,各生态修复模式的减沙效益达到最大,产沙减少 40.02%~75.08%。当降雨等级大于中雨时,这些模式的减沙效果则会受到一定影响,均有所减小。大雨和暴雨等级下,除砾石压盖模式与对照无显著差异外( $P > 0.05$ ),其他模式产沙均显著低于

对照( $P < 0.05$ ),其中沙柳网格模式产沙量均最低,显著低于其他模式( $P < 0.05$ )。由此可以看出,无论在何种降雨等级下,沙柳网格模式的减沙效益均最大,表明该模式的减沙效果最为突出,其次为生态棒模式,而砾石压盖模式在各降雨等级下的减沙效果均最差。同样,各生态修复模式及对照在暴雨等级产生的泥沙量是这些模式在其他降雨等级的产沙量总和的 1.02~1.35 倍,远高于其他降雨等级的总和,是这些模式在中雨等级下产沙量的 3.05~4.51 倍,表明偶尔出现的暴雨对排土场边坡泥沙流失同样危害最大,其次为大雨和发生次数最多的中雨。

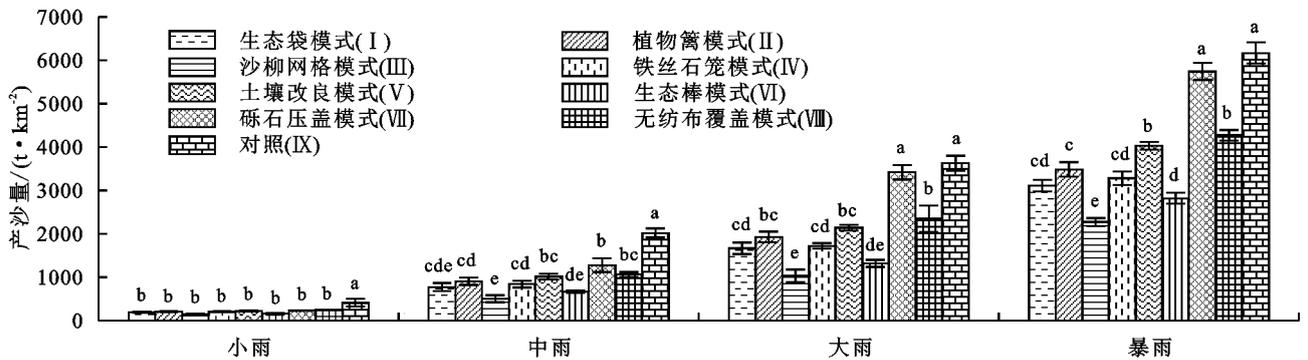


图 3 不同降雨等级下各生态修复模式产沙特征

#### 2.4 不同生态修复模式泥沙流失对径流的响应

坡面径流是引起坡面土壤流失的主要动力,探明不同生态修复模式产沙量对产流量的响应特征对于认识各生态修复模式下的产流产沙效应具有重要的科学意义。次降雨诱导下不同生态修复模式产流量与产沙量相关系数见表 3。从表 3 可以看出,各模式产沙量对产流量的响应特征均呈显著正相关关系,相关系数  $r$  均在 0.98 以上,表明各模式产流量与产沙量之间具有较好的相关性,但不同生态修复模式产沙量对产流量的响应程度存在明显差异。

为了进一步探明次降雨诱导下不同生态修复模式产沙量随产流量变化规律,将各生态修复模式累积产沙量与累积产流量进行函数拟合,从表 3 可以看出,不同生态修复模式的累积产沙量( $Y$ )与累积产流量( $X$ )之间存在线性关系,拟合方程为  $Y = aX + b$ ,拟合优度  $R^2$  都在 0.96 以上,说明这些模式产沙 96% 以上是由径流决定,采取减流措施可以有效抑制侵蚀的发生。拟合方程斜率表示各模式累积产流量对累积产沙量的影响,斜率越大,表示径流对泥沙的决定性作用越强。从回归方程来看,不同修复模式  $a$  均大于 0,表明在次降雨诱导下不同修复模式累积产沙量均随着累积产流量增加而增加。从  $a$  大小来看,对照  $a$  最大,沙柳网格模式  $a$  最小,其他模式  $a$  介于两者之间,表明不同修复模式下泥沙流失对坡面径流

响应程度为  $IX > VIII > V > II > IV > I > VII > VI > III$ ,即在相同径流量诱导下,对照产沙量最大,无纺布覆盖模式产沙量次之,沙柳网格模式产沙量最小。

表 3 不同生态修复模式累积产流量与累积产沙量间的回归分析

生态修复模式	回归方程	$R^2$	显著性水平	Pearson 相关系数 $r$
生态袋模式 I	$y = 98.14x + 151.09$	0.9756	0	0.988
植物篱模式 II	$y = 103.30x + 113.90$	0.9825	0	0.991
沙柳网格模式 III	$y = 91.90x + 75.48$	0.9869	0	0.993
铁丝石笼模式 IV	$y = 100.20x + 116.20$	0.9777	0	0.989
土壤改良模式 V	$y = 110.14x - 28.19$	0.9669	0	0.983
生态棒模式 VI	$y = 96.18x + 89.36$	0.9835	0	0.992
砾石压盖模式 VII	$y = 97.64x + 48.60$	0.9715	0	0.986
无纺布覆盖模式 VIII	$y = 112.25x - 8.32$	0.9679	0	0.984
对照 IX	$y = 116.99x + 49.68$	0.9944	0	0.997

### 3 讨论

本文基于自然降雨研究了 9 种模式下排土场边坡产流产沙特征。结果表明,相同降雨条件下累积产流量和累积产沙量整体表现为  $IX > VII > VIII > V > II > I > IV > VI > III$ ,其中沙柳网格模式的减流减沙效果最好,此结论与史倩华等<sup>[5]</sup>的研究结果类似,这是因为各模式对径流的拦蓄效果一方面与各模式的植被盖度有关,另一方面与各模式的措施布设间距和布设结构有关。沙柳网格模式中沙柳小网格布设格局将坡面分割成众多小空间,径流的汇流路径较短,

避免汇集成具有较大流速和动能的股流,并且径流在经过沙柳条后,受到疏透度较低沙柳条的拦截,增大运动阻力,导致径流流速降低,增加地表雨水的下渗时间,对降雨量的消耗较大,从而减少地表产流量,而径流是泥沙的载体,当径流量较小时,其携沙能力也较弱,因此沙柳网格模式蓄水减沙效益更高。生态棒菱形布设结构可分块拦截径流,减小坡面径流的汇水面积,从而减小径流冲刷量和冲刷强度,但与沙柳网格模式相比,生态棒模式对坡面的分割程度较低,导致蓄水减沙效果略低于沙柳网格模式,但较生态袋、铁丝石笼等模式其措施间距较小,能够有效延阻坡面径流,增加入渗,促使泥沙沉降,所以其累积产流产沙量也较少。铁丝石笼模式、生态袋模式、植物篱模式通过拦截和减缓地表径流速度的方式降低径流的携沙能力,但措施间距较沙柳网格模式、生态棒模式大,降低和阻拦径流连续性的能力相对较差,所以对径流、泥沙的截留效果则有所减弱。而无纺布容易降解,在铺盖早期因风吹、太阳暴晒等原因快速降解破坏,所以同土壤改良模式、对照都属于生物措施,当降雨量较大时产生的径流也较多,而植被对径流的削减能力有限,坡上位径流向下运动时有足够的加速空间,坡面径流会由分散水流逐渐变成集中水流,因此这些模式的蓄水减沙效益较差。而对照既无工程措施改变微地形的起伏,植被覆盖度又最低,降雨可直接冲刷地表,破坏表层土壤结构,使得土壤孔隙减少,形成“板结”,影响土壤入渗率,增加地表径流量,特别是在中、大、暴雨情况下,在连续顺坡上容易产生细沟或浅沟侵蚀,导致产流量和产沙量均较多。生态袋、植物篱、铁丝石笼模式间的累计产流量无显著性差异,可能因为这 3 种模式间的间距相同,对径流的拦截作用相似,但生态袋与植物篱模式的累计产沙量却存在显著性差异,可能因为拦挡措施的材料不同所致;当径流量较大时,径流会越过生态袋上部向坡下流动,部分泥沙会因为重力作用在生态袋的拦截作用下淤积在生态袋前,而植物篱模式由于扦插的柽柳条成活率不太高(78.13%),枝叶稀疏,蔽合度低,截流拦沙作用微弱,较生态袋模式,植物篱上方的坡面的松散颗粒在带前淤积量较少,随着径流下移。有研究<sup>[10]</sup>表明,从布设初期到真正形成具有良好水土保持作用的完整植物篱生长时间较长,所以长时间下植物篱模式的水土保持效益还有待进一步探究。本研究砾石压盖模式在较高覆盖度下产生较多的径流和泥沙量的结果与景民晓等<sup>[11]</sup>得出的总产流产沙量与砾石含量呈负相关的研究结果相反,可能是因为其试验的砾石覆盖度较低所致(10%~30%)。本研究砾石压盖模式的砾石覆盖度达 85%左右,且砾石尺寸

约 25~35 m,对于含砾石的坡面来说,土壤中砾石的存在增加土壤不透水断面的面积而阻碍入渗,除此之外,经过多场次降雨,砾石与土壤之间的缝隙可能被泥沙填充,降雨入渗量减小,降雨转化为地表径流量增大,地表径流率增大,同时大砾石的存在又会促进坡面径流的合并—汇流,使得坡面水流宽度减小,水流更加集中,流动能量更大,上述因素均会造成砾石坡面产生较多地表径流。该结论与马晨雷等<sup>[12]</sup>、樊春华等<sup>[13]</sup>试验得出的结论相似。砾石压盖模式虽不能降低坡面径流量,但却能有效抑制坡面土壤的侵蚀,主要由于坡面较多的砾石能够起到类似盔甲的作用<sup>[14]</sup>,保护坡面土壤免受雨滴的溅蚀,同时也可抑制径流对土壤的冲刷,减少径流的含沙量,所以其总产沙量较小。该结果与陈心逸等<sup>[15]</sup>等对砾石含量为 0, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% 的含砾石盐碱土研究结果相似,但也有部分学者<sup>[16-17]</sup>的研究表明,堆积体的产沙量与砾石含量(0, 10%, 20%, 30%, 40%)呈正相关关系。可见,因砾石含量的不同对侵蚀可产生或促进或抑制的作用。

本文研究不同降雨等级下各生态修复模式产流产沙特征的结果表明,9 种模式下产流量和产沙量均随小雨、中雨、大雨、暴雨依次递增,这与已有研究<sup>[18-19]</sup>的结果一致。本研究发现,各模式的减流效益随降雨等级的增加呈现先增加后降低的趋势,当降雨等级为中雨时减流效益达到最大,大于中雨等级后减流效益降低,说明各模式对中雨的拦截作用最为明显,对大雨、暴雨的拦截作用不明显,这与张杰等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。降雨等级较低时减流效益随降雨等级的增加而增加的原因可能是,当降雨量小于中雨等级时,降雨量较少,坡面产生的径流在各模式的拦截作用下入渗、填洼等消耗后,转化为地表径流部分较小。中雨时各模式的减流效益达到最大。当降雨等级大于中雨时,降雨量的增加都会使坡面单位面积的承雨量减小,各模式坡面土壤水分都会很快达到饱和使其下渗量较低,因此各模式与对照产流量的差距减小,导致减流效益减小。小雨等级时各模式间无显著性差异,这是因为小雨降雨量较少,降雨侵蚀力小,大部分能够被拦截入渗。随着降雨等级的增大各模式的产流差距逐渐增大。各模式的减沙效益随降雨等级的变化与减流效益一致,也是随着降雨等级的增加先增加后减少,无论在何种降雨等级下,沙柳网格模式的径流、泥沙均最小,表明沙柳网格模式的水土保持作用最好。但砾石压盖模式最大径流量并未导致最大泥沙流失量出现,说明砾石压盖模式虽然不能减少坡面径流的产生,但能有效减少坡面土壤的流失,也表明径流不是影响泥沙流失的唯一因素,坡面

泥沙流失还受其他因素的影响<sup>[21]</sup>,例如坡面治理模式等。造成砾石压盖模式产沙量相对减少的原因主要有:一是由于砾石在坡面中占有一定的空间,可形成一层“铠甲”,保护地表土壤免受雨滴冲击并拦截地表径流<sup>[22-23]</sup>,且边坡侵蚀方式以细沟侵蚀为主,导致侵蚀物质来源较对照减少;二是因为砾石的存在可以改变土壤的物质组成和结构,增强土壤的抗蚀性和抗冲性,有效抑制高强度降雨对表土的溅蚀<sup>[24]</sup>。产流量和产沙量与高强度降雨密切相关,本研究发现,虽然观测期间该研究区只有1次暴雨,占侵蚀性降雨场次和产流总降雨量的14.29%和40.8%,但各模式暴雨下造成的坡面产流量、产沙量占各降雨等级下产流量和产沙量总和的比重较大(分别占50%~60%和50%~58%),造成的水土流失情况最严重。在中雨等级下虽然造成的坡面产流量、产沙量占各降雨等级下产流量和产沙量总和的比重较小(分别占10%~15%和12%~17%),但是由于中雨的降雨次数多,其造成的泥沙流失也不可忽视。

降雨和径流是坡面土壤被分离和泥沙搬运的主要动力,土壤侵蚀的发生离不开径流。本研究表明,各生态修复模式地表径流和土壤流失量之间存在线性函数关系,且模型的决定系数较高,与朱燕琴等<sup>[25]</sup>研究的结果相同。比较不同生态修复模式产沙量与产流量的相关系数 $r$ 可知,对照的相关系数较各生态修复模式最大,表明对照产沙量受产流量影响较各生态修复模式大,这是因为对照坡面未有生态修复模式且植被覆盖度低导致的:由于对照坡面无生态修复模式的拦截作用,径流从坡上运动到坡下过程中能量较大,剥离和搬运土壤的能力较强,导致被侵蚀的泥沙大部分随径流迁移到集流桶;此外,对照坡面植被覆盖度较低,表层土壤长期受外营力侵蚀作用,次降雨过程中易于剥离和搬运。而各生态修复模式坡面径流侵蚀产生的泥沙在生态修复模式的拦截下,会大量沉积在坡面上,且径流在受到阻拦后流速相对较小,降低对地表土壤的剥离和搬运能力,因此相同径流诱导下各生态修复模式的产沙量均低于对照。

## 4 结论

(1)自然降雨条件下,对照(撒播灌草种子)的水土流失最严重,生态袋、植物篱、沙柳网格、铁丝石笼、土壤改良、生态棒、砾石压盖、无纺布覆盖模式均有不同程度的减流减沙的作用,其中沙柳网格模式减流减沙效果最好,生态棒模式次之,砾石压盖模式较差。

(2)各模式下产流量和产沙量均随降雨等级增加呈增加趋势,无论在何种降雨等级下,沙柳网格模式的减流减沙效益均最大,生态棒模式次之,砾石压盖模式最差。

(3)各模式产流量与产沙量之间呈线性正相关关系,产沙量随产流量增加的速度由大到小依次为对照>无纺布覆盖模式>土壤改良模式>植物篱模式>铁丝石笼模式>生态袋模式>砾石压盖模式>生态棒模式>沙柳网格模式,在产生相同径流量时,沙柳网格模式的产沙量最小,其减流减沙效果最好,适合在该区域矿山废弃地防治水土流失中推广应用。

## 参考文献:

- [1] 王海宁.中国煤炭资源分布特征及其基础性作用新思考[J].中国煤炭地质,2018,30(7):5-9.
- [2] 杨波,王文龙,郭明明,等.矿区排土场边坡不同植被配置模式的控蚀效益研究[J].土壤学报,2019,56(6):1347-1358.
- [3] 卞正富,沈渭寿.西部重点矿区土地退化因素调查[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):173-177.
- [4] 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[J].农业工程学报,2015,31(3):296-303.
- [5] 史倩华,李焱林,王文龙,等.不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响[J].草地学报,2016,24(6):1263-1271.
- [6] 李宏伟,王文龙,王贞,等.神府东胜煤田扰动地面野外降雨试验[J].水土保持学报,2012,26(2):11-15.
- [7] 郭建英,何京丽,李锦荣,等.矿区人工再塑地貌对锡林郭勒草原土壤侵蚀的影响及其控制效果[J].水土保持学报,2015,29(1):56-61.
- [8] 花东文,温仲明.黄土丘陵区不同植被恢复阶段下的暴雨产流产沙研究[J].水土保持学报,2015,29(4):27-31.
- [9] 中国气象局.降雨量等级 GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [10] 李铁,湛芸,何丙辉,等.天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用[J].水土保持学报,2019,33(3):27-35.
- [11] 景民晓,谢永生,李文华,等.不同土石比例弃土堆置体产流产沙模拟研究[J].水土保持学报,2014,28(3):78-82.
- [12] 马晨雷,戴翠婷,刘睿军,等.砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):150-155.
- [13] 樊春华,赵龙山,李开凤,等.多场次降雨条件下不同土石镶嵌坡面土壤侵蚀特征[J/OL].土壤学报,2020 DOI:10.11766/trxb202011020606.
- [14] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.
- [15] 陈心逸,李丽,余冬立.砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征[J].水土保持学报,2018,32(1):116-120.
- [16] 吴冰,朱元骏,邵明安.含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J].中国水土保持科学,2011,9(1):99-103.

- 与土壤抗蚀性关系研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):111-115.
- [6] Fernando S F, Antonio M G, Carmelo Á Z, et al. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain)[J].*Geoderma*,2019,354(11):e113872.
- [7] 王文艳,张丽萍,刘俏,等.黄土中主要矿物构成对土壤抗蚀性的影响及空间变异[J].水土保持学报,2013,27(4):7-11.
- [8] 王针针,刘泉宏,湛芸,等.紫色土区植物篱篱前淤积带与篱下土坎土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(5):61-67.
- [9] Chen Z X, Guo M M, Wang W L. Variations in soil erosion resistance of gully head along a 25-year revegetation age on the Loess Plateau[J/OL].*Water*,2020,12(12). DOI:10.3390/w12123301.
- [10] Chang E H, Li P, Li Z B, et al. The impact of vegetation successional status on slope runoff erosion in the Loess Plateau of China[J/OL].*Water*,2019,11(12):2614. <https://doi.org/10.3390/w11122614>.
- [11] 谢庭生,何英豪.湘中紫色土丘岗区水土流失规律及土壤允许侵蚀量的研究[J].水土保持研究,2005,12(1):87-90.
- [12] 史晓梅.紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [13] 黄新君.紫色土坡耕地耕层结构稳定性及对抗蚀性影响[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [14] 吕宸,官渊波,车明轩,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(2):9-17.
- [15] 张华渝,王克勤,宋娅丽.滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J].水土保持学报,2019,33(5):50-57.
- [16] Armstrong J S. Derivation of theory by means of factor analysis or tom swift and his electric factor analysis machine[J]. *The American Statistician*,2012,21(5):17-21.
- [17] 史东梅,吕刚,蒋光毅,等.马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J].水土保持学报,2005,19(6):37-41.
- [18] 周冉冉,陈佩,郭世荣,等.醋糟和菇渣基质改良剂对连作障碍土壤理化性质及栽培黄瓜的影响[J].中国蔬菜,2021,385(3):57-64.
- [19] 任霞,严宁珍,程永毅,等.重庆溶洼—丘峰区土地利用类型对土壤抗蚀性的影响[J].中国岩溶,2020,39(6):829-835.
- [20] 王培,郭天雷,高强,等.不同生物埂模式对川中丘陵区坡耕地土壤抗蚀性的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):7-11.
- [21] Hou X Q, Li R, Jia Z K, et al. Effect of rotational tillage on soil aggregates, organic carbon and nitrogen in the Loess Plateau Area of China[J].*Pedosphere*,2013,23(4):542-548.
- [22] 姜爱国,万福绪,胡菲.南京紫金山灵谷寺不同林地土壤抗蚀性研究[J].水土保持研究,2018,25(1):12-16.
- [23] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(4):100-108.
- [24] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- [25] Zhao Z M, Shen Y X, Shan Z J, et al. Infiltration patterns and ecological function of outcrop runoff in Epikarst Areas of Southern China[J].*Vadose Zone Journal*,2018,17(1):1-10.
- [26] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.
- [27] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.

(上接第 21 页)

- [17] 王雪松.红粘土工程堆积体侵蚀规律研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [18] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33.
- [19] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.
- [20] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):165-173.
- [21] 宋江平,李忠武,刘春,等.湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J].水土保持学报,