

# 雨强和坡度对铁尾矿砂坡面复垦前后产流产沙的影响

郭星星, 吕春娟, 陈丹, 郭岩松, 王煜

(山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:**运用人工模拟降雨技术,研究铁尾矿砂裸坡及复垦坡面在雨强和坡度共同作用下的产流产沙特征。结果表明:(1)坡面产流及产沙受各因子影响程度均为:雨强>坡度>基质类型。(2)就铁尾矿砂裸坡而言,雨强对坡面产流影响显著,坡面产流随着雨强和坡度的增大均呈现递增趋势,随着雨强的增大,其作为坡面产流主导因素的作用突显,会出现掩盖坡度对坡面产流影响的现象;坡面产沙随着雨强的增大基本呈现递增趋势,且坡度越大产沙的增幅越大,雨强和坡度对坡面产沙影响均显著。(3)在复垦设计坡度25°条件下,就减流效果而言,不同基质类型复垦坡面间减流规律相似、效果差别甚微,随着雨强的增大减流效果逐渐消失;单纯考虑减沙效果,不同复垦坡面的减沙效果因基质的不同存在一定的差异,综合考虑不同雨强下的减沙效果,铁尾矿砂与菌糠混合物是复垦坡面基质的最优选择。研究结果可为铁尾矿砂裸坡土壤侵蚀的防治和铁尾矿库复垦提供经验参考和合理建议。

**关键词:**模拟降雨;铁尾矿砂;复垦坡面;产流产沙

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0008-06

## Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Sediment Production on the Slope Before and After Reclamation in Iron Tailings

GUO Xingxing, LÜ Chunjuan, CHEN Dan, GUO Yansong, WANG Yu

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** The rainfall simulation technique was applied to study the characteristics of runoff and sediment yield under the combination of rain intensity and slope on slope before and after reclamation in the iron tailings. The results showed that: (1) the influence of various factors on runoff and sediment yield on slope decreased in the order: rainfall intensity>slope gradient>substrate type; (2) in the case of bare slopes of iron tailings, rainfall intensity significantly affected runoff on the slope, and the runoff presented the increasing trend with the increase of rainfall intensity and slope gradient; as the rainfall intensity increased, its role as the dominant factor of slope runoff was prominent, and the phenomenon covering the effect of slope gradient on the runoff occurred; the sediment yield increased with the increase of rainfall intensity, the increase of sediment yield became larger when the slope gradient was greater, the influences of rainfall intensity and slope gradient on the sediment yield were significant; (3) under the condition of designed reclamation slope with 25°, in terms of the effect of runoff reduction, the patterns of runoff reduction among different substrates were similar, and the effects were little different; with the increase of rainfall intensity, the effect of runoff reduction gradually disappeared; considering the effect of sediment reduction only, the effects of sediment reduction on different reclamation slopes were different because of the different substrates; with respect to comprehensive consideration of sediment reduction effects under different rainfall intensities, it was the best choice to use the mixture of iron tailings and mushroom residues as the substrate for slope reclamation. The results can provide empirical references and reasonable suggestions for the prevention and control on erosion on bare iron tailing slope and the reclamation of iron tailing pond.

**Keywords:** simulated rainfall; iron tailings; reclamation slope; runoff and sediment yield

我国社会经济的发展促使矿产资源开采总量不断攀升,因尾矿堆积引发的各种问题愈演愈烈,据国家发展改革委发布的《中国资源综合利用年度报告(2014)》,我国尾矿累积堆存量达 146 亿 t;2013 年,我国尾矿产生量共计 16.49 亿 t,其中仅铁尾矿达 8.39 亿 t,占比 50.88%,相比较 2009 年铁尾矿 5.36 亿 t 的年产生量增长了 56.53%。铁尾矿已经成为我国工业固体废弃物的主要组成部分,堆存量巨大且综合利用率最低,更为棘手的是其年排放量仍在不断增加<sup>[1]</sup>。铁尾矿的堆存占用了大量的土地资源,未经任何处理的铁尾矿砂存在严重的水土流失现象,严重破坏了周围的生态环境,甚至对周边居民的生命和财产安全构成了严重威胁<sup>[2-3]</sup>。尾矿库复垦对于矿区土地再利用及生态的恢复具有重要意义,在水土保持领域备受重视<sup>[4]</sup>。铁尾矿库的复垦不仅能解决尾矿砂水土流失等问题,而且对矿区生态环境的恢复大有裨益,在解决生态环境问题的同时,也会产生一定的社会和经济效益<sup>[3]</sup>。

雨强和坡度是影响坡面产流产沙的主要影响因素,国内外有关雨强和坡度对坡面产流产沙的研究较多,如黄土高原细沟侵蚀特征及坡面产流产沙动态变化<sup>[5-6]</sup>,紫色土壤的水流动力学及产流产沙特征<sup>[7]</sup>,喀斯特地区以及坡耕地的产流产沙规律<sup>[8-10]</sup>,黄壤旱坡地的响应机制等<sup>[11]</sup>。以往的研究对象主要为坡耕地,坡耕地为长期受降雨侵蚀的土壤,而铁尾矿砂复垦坡面的基质一般由不同的改良材料于短时间内形成,与坡耕地的原地貌土壤性状明显不同,容重、入渗性、颗粒组成等物理性状有巨大的差别,而针对铁尾矿砂复垦坡面产流产沙的研究却未见涉足,其坡面产流产沙的特征尚不明确,且不同地区铁尾矿的尾矿特性、排放方式与条件、堆存条件以及当地的环境情况不尽相同,造成复垦情况的复杂性。所以铁尾矿的复垦要坚持因地制宜的原则,充分考虑当地条件,实施高效合理经济的复垦方案。本文以山西省垣曲县泉子沟铁尾矿库为研究区,采用人工模拟降雨,研究在雨强和坡度影响下铁尾矿砂裸坡产流产沙特征,以及初次尝试将菌糠增加为坡面复垦的原材料,分析其在减流减沙方面的成效,以期铁尾矿区复垦抑或是无土复垦与生态环境恢复提供参考与依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料及预处理

供试材料主要由铁尾矿砂(Iron tailing sand, T)、生土(Raw soil, S)和菌糠(Mushroom residue, M)。铁尾矿砂采集于山西省运城市垣曲县国泰矿业

有限公司泉子沟干排尾矿库(111.41°N, 35.14°E),将供试铁尾矿砂置于阴凉处,待其自然风干后过 2 mm 筛,以备装填土槽所用;生土采自山西省运城市垣曲县泉子沟附近,处理方法同上,菌糠采集于泉子沟干排尾矿库附近蘑菇种植基地,粉碎后过 5 mm 筛,置于阴凉处自然风干,作为复垦基质添加材料。

1.2 试验设计

试验设计 5 个土槽,为了模拟野外复垦剖面,土槽底部 40 cm 均为铁尾矿砂,其中一个土槽作为对照,表层同样为 20 cm 厚度的铁尾矿砂(Control Iron Tailings, CT),其余表层为 20 cm 厚度的复垦基质,分别为铁尾矿砂与菌糠混合物(Iron Tailings and Mushroom mixture, TM),铁尾矿砂、菌糠和生土混合物(Iron Tailings, Soil and Mushroom mixture, TSM),铁尾矿砂和生土混合物(Iron Tailings and Soil mixture, TS)、生土(Raw Soil, S),装填过程中分层间打毛并保证平实以消除分层效应,且人为压实坡面边界以减小边界效应影响<sup>[12]</sup>。设计容重为野外实测平均容重(表 1)。基于铁尾矿库尾矿砂堆存的实际情况,铁尾矿砂坡面设计了 25°,30°和 35°共 3 种坡度。本文主要研究短历时暴雨对铁尾矿砂裸坡及复垦坡面侵蚀影响的演变情况,根据《中国暴雨统计参数图集(2006 版)》得到山西省百年一遇 60 min 暴雨的雨强为 60~120 mm/h,结合张汉雄<sup>[13]</sup>提出的黄土高原暴雨标准,为防止极端降雨情况引起的水土流失带来的自然灾害,设计 60 mm/h、90 mm/h 和 120 mm/h 共 3 种雨强模拟普通暴雨、中型暴雨、大型暴雨。每场降雨的降雨时长设计为 30 min,均从产流后开始计时。对于铁尾矿砂坡面,同一个坡度下按雨强从小到大的顺序逐场降雨,3 种雨强 3 场次降雨结束后,更换坡度以设计要求重新装填表层 20 cm 铁尾矿砂,按以上的降雨顺序完成该坡度下的降雨试验,直至完成所有坡度条件下的降雨试验。然后分析遴选最佳复垦坡度,按照最佳复垦坡度设计复垦基质坡面进行降雨试验,方法顺序同上,试验设置 3 次重复。试验因素水平设计见表 1。

表 1 试验表层基质设计特征

坡面类型	基质组成(质量比)	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	复垦基质厚度/cm	降雨历时/min
CT	铁尾矿砂	1.65	—	30
TM	铁尾矿砂:菌糠=10:1	1.35	20	30
TSM	铁尾矿砂:菌糠:生土=10:1:4	1.4	20	30
TS	铁尾矿砂:生土=2.6:1	1.5	20	30
S	生土	1.3	20	30

1.3 模拟降雨

模拟降雨试验在山西农业大学资源环境学院实

验站进行。试验采用自行设计的倾斜式混凝土土槽以及西安清远测控技术有限公司定制的 QYJY-501 便携式全自动下喷式模拟降雨器完成。混凝土土槽的规格为:长 2 m×宽 1 m×高(0.6~2.3 m),土壤坡面装填坡度可变范围在 0°~40°之间,土槽前端设计有集流口,使用径流桶于集流口处收集径流泥沙样。降雨开始前用水分测定仪测定坡面含水率,保证在降雨试验前所有土槽的体积含水率一致,保持在 8%左右。降雨开始后,以坡面产流为时间节点开始计时,每隔 3 min 收集一次径流泥沙样,直至降雨结束,用量筒测量径流泥沙样的总体积,待径流泥沙样完全澄清后倒掉上层清液,之后将泥沙样置于烘箱(105℃)烘干称重得到产沙重量。模拟降雨器高度为 4 m,满足设计雨强模拟天然降雨特征的条件,有效降雨范围面积为 2.5 m×2.5 m,降雨过程中的水压恒定,降雨均匀度大于 80%,基本可模拟野外降雨的实际环境。

#### 1.4 数据处理

研究中的数据利用 Excel(R2016)、SPSS 20.0 以及 DPS7.05 软件进行处理分析,图采用 Excel(R2016)完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面产流产沙对各因子的响应程度

坡面产流产沙的影响因素众多,不同因子对坡面产流产沙的影响程度不同<sup>[14-15]</sup>。采用灰色关联度分析法,对影响因子——雨强、坡度和基质类型进行综合分析,研究坡面产流产沙对各因子的响应程度。雨强以试验设计雨强值表示,坡度以试验设计坡度值表示,基质类型采用分类赋值法:CT, TM, TSM, TS, S 分别赋值为 1, 2, 3, 4, 5。通过 DPS 数据处理软件计算,得到各因子与坡面产流产沙灰色关联度的结果见表 2。

表 2 各因子与坡面产流产沙灰色关联度

影响因子	各因子与坡面 产流的灰色关联度	各因子与坡面 产沙的灰色关联度
雨强	0.871	0.759
坡度	0.772	0.724
基质类型	0.620	0.718

雨强、坡度和基质类型与坡面产流产沙的灰色关联度大小顺序均为:雨强>坡度>基质类型,即坡面产流受雨强的影响程度最大,坡度次之,基质类型的影响程度相对最弱;由此可见,在雨强、坡度和基质类型三者共同作用时,雨强是影响坡面产流产沙的主要因素,坡度次之。为取得铁尾矿区良好的复垦效果,减小雨强对坡面产流产沙的作用是首要任务,其次设

计合理的复垦坡度是复垦工作的重中之重,最后选择合适的复垦基质是复垦成功与否的关键。

### 2.2 雨强和坡度对铁尾矿砂坡面径流率的影响

径流率是侵蚀产流过程的一个主要体现指标,利用 LSD 法进行多重比较,同一坡度条件下不同雨强间 CT 坡面径流率差异显著(表 3)。随着雨强的增大,坡面径流率也出现了不同程度的增加,坡度为 25°时,60 mm/h 雨强下坡面径流率为 1.34 L/min,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 时坡面径流率分别增加了 46.27%和 43.28%;坡度为 30°时,60 mm/h 雨强下坡面径流率为 1.06 L/min,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 的坡面径流率分别增加了 105.66%和 145.28%;坡度为 35°时,60 mm/h 雨强下坡面径流率为 0.75 L/min,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 的坡面径流率分别增加了 177.33%和 285.33%。由此可见,坡面径流率随着雨强的增大呈现逐渐增大的趋势,且坡度越大,坡面径流率随雨强的增幅越大。同一雨强下不同坡度间坡面径流率的变化有所差异,雨强为 60 mm/h 时,不同坡度间坡面径流率差异显著,但雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 时,坡面径流率在不同坡度间差异并不显著。究其原因,在雨强较小时,此时坡度对坡面产流起主导作用,随着雨强的增大,其对于坡面径流率的影响程度随之增强,成为坡面径流率的主导因素,相反坡度对坡面径流率的影响程度减弱,雨强对坡面径流率的影响掩盖了坡度对坡面径流率的影响。

表 3 雨强和坡度对坡面径流率的影响 L/min

坡度/ (°)	不同雨强下坡面径流率		
	60 mm/h	90 mm/h	120 mm/h
25	1.34Ba	1.96Aa	1.92Ab
30	1.06Cb	2.18Ba	2.60Aa
35	0.75Cc	2.08Ba	2.89Aa

注:同列不同小写字母表示组间差异显著( $p<0.05$ ),同行不同大写字母表示组间差异显著( $p<0.05$ ),反之则表示组间差异不显著( $p>0.05$ ),下同。

### 2.3 雨强和坡度对铁尾矿砂坡面产沙率的影响

降雨是造成水土流失的主要因素,而在一定程度上坡度是水土流失至关重要的影响因素。通过差异显著性分析,不同雨强及不同坡度对坡面产沙的影响差异显著(表 4)。同一坡度条件下,不同雨强间坡面产沙率相差较大,坡度为 25°时,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 的坡面产沙率分别是 60 mm/h 坡面产沙率的 4.05, 3.24 倍;坡度为 30°时,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 的坡面产沙率分别是 60 mm/h 雨强下坡面产沙率的 10.36, 13.24 倍;坡度为 35°时,雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 的坡面产沙率分别是 60

mm/h 雨强下坡面产沙率的 23.16,36.56 倍。由此可见,坡面产沙率随着雨强的增大基本呈现递增的趋势,且坡度越大,坡面产沙率的增幅越大。

同一雨强条件下,不同坡度间坡面产沙率的差异均较显著,但其随坡度变化的趋势有所差异。雨强为 60 mm/h 时,产沙率与坡度呈负相关,但当雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 时呈正相关。在雨强为 60 mm/h 降雨历时过程中,坡度为 25°时,由于雨强相对较小,坡度相对较缓,坡面没有明显的细沟形成;但坡度为 30°,35°时,坡度相对较大,土体的稳定性下降,坡面径流的动能相应地增大,较易形成具有一定深度的细沟,细沟随着降雨时间的增加不断发育,在发育的过程中伴随着沟壁土体的滑落和堆积,坡面容易因搬运作用发生崩塌,崩塌后造成沟道阻塞,径流和泥沙受到一定程度的阻滞,出现产沙率随坡度增大而减小的现象。在雨强为 90,120 mm/h 时,由于雨强较大,坡面径流率较大,细沟的崩塌不易造成沟道的阻塞,故而产沙率随着坡度的增大呈现逐渐递增的趋势。

表 4 雨强和坡度对坡面产沙率的影响 g/min			
坡度/ (°)	不同雨强下坡面产沙率		
	60 mm/h	90 mm/h	120 mm/h
25	59.33Ca	240.30Ab	192.01Bc
30	29.37Cb	304.20Ba	388.94Ab
35	14.14Cc	327.48Ba	516.90Aa

图 1 为 CT 坡面在不同雨强与坡度条件下产沙量的对比情况,产沙率不同最直观的反映为产沙量的不同,不同雨强不同坡度间,产沙量差距明显。其中坡度为 25°时,不同雨强下坡面产沙总量远小于其他坡度时不同雨强下的坡面总产沙量。综上所述,结合坡面径流率变化的分析以及介于实际复垦可行性的考虑,试验设计坡度值中减少坡面侵蚀最理想的复垦坡度为 25°。

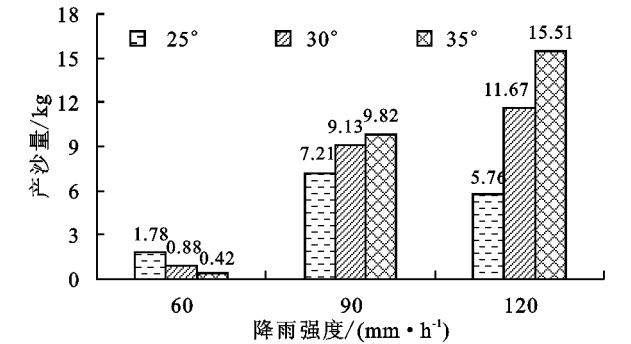


图 1 不同雨强与坡度条件下 CT 坡面产沙量对比

2.4 复垦基质类型对坡面产流产沙的影响

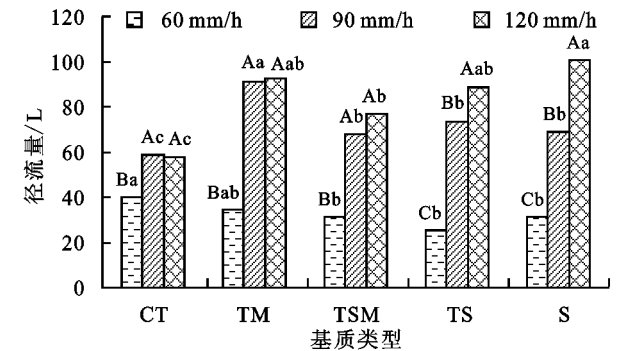
根据以上对坡度与坡面产流产沙的研究分析,同时结合铁尾矿库尾矿砂堆存实际情况,就试验设计坡度而言,减少坡面侵蚀的最佳坡度为 25°。因此以

25°为复垦设计坡度,分别对不同雨强与基质类型条件下复垦坡面的产流产沙进行对比分析(图 2,图 3)。

对比不同雨强与基质类型条件下复垦坡面的径流量可以发现(图 2),同一基质类型条件下的复垦坡面在不同雨强下的径流量情况因基质类型的不同有所差异,其中 TM 和 TSM 复垦坡面不同雨强下的径流量差异性一致,雨强为 60 mm/h 时与 90 mm/h 和 120 mm/h 时的径流量差异显著,但雨强为 90 mm/h 与 120 mm/h 时的径流量差异并不显著;TS 与 S 复垦坡面不同雨强下的径流量差异性一致,不同雨强下的径流量差异显著。不同基质类型条件下的复垦坡面在同一雨强条件下的径流量并未因基质的不同而形成差异,同一雨强下各复垦坡面间的径流量差异并不显著,但与 CT 坡面相比,差异性均显著。

由图 2 所知,与 CT 坡面相比较,雨强为 60 mm/h 时,复垦后各基质坡面的径流量都相对有所减少,TM,TSM,TS 和 S 坡面分别减少了 14.18%,22.39%,36.57%和 22.39%;可以看出铁尾矿砂坡面复垦后各基质坡面的减流能力得到了一定程度的提升,其中 TS 坡面的减流效果最为显著。雨强为 90 mm/h 和 120 mm/h 时,此时雨强远超坡面入渗能力,且由于坡面径流的动能增大,从而坡面径流的流速增大,降雨落于坡面迅速形成径流流出坡面,但尾矿砂相对其他基质类型坡面水分下渗较快,因此出现 CT 坡面的径流量与其他坡面的径流量相比较反而更少的情况,其中生土坡面 S 的径流量最大。

综上所述,各复垦坡面与 CT 坡面相比是否具有减流效果的临界雨强在 60~90 mm/h 之间,不同复垦基质坡面的临界雨强可能有所不同,当小于临界雨强,复垦坡面具有一定程度的减流能力,反之坡面径流量大于未复垦坡面的径流量,则达不到减流的效果;就减流效果而言,不同基质类型复垦坡面间减流规律相似,减流效果差别甚微。



注:不同小写字母表示同一雨强条件下差异显著( $p<0.05$ ),不同大写字母表示同一基质类型条件下差异显著( $p<0.05$ ),反之则表示组间差异不显著( $p>0.05$ ),下同。

图 2 不同雨强与基质类型条件下复垦坡面的径流量对比

对比不同雨强与基质类型条件下复垦坡面的产沙量可以发现(图 3),同一基质类型条件下的复垦坡面在不同雨强下的产沙量情况因基质类型的不同有所差异,其中 TM 复垦坡面不同雨强下的产沙量差异性显著;TSM,TS 和 S 复垦坡面不同雨强下的产沙量差异性一致,雨强为 60 mm/h 时与 90 mm/h 和 120 mm/h 时的产沙量差异显著,但雨强为 90 mm/h 与 120 mm/h 时的产沙量差异并不显著。不同基质类型条件下的复垦坡面在同一雨强条件下的产沙量因基质的不同呈现出较大的差异,同一雨强下各复垦坡面的产沙量差异显著,与 CT 坡面相比,各复垦坡面的减沙效果明显,尤其是在雨强为 60 mm/h 时减沙最为显著。

对坡面产沙量而言,除 TS 坡面外,复垦后坡面对降雨造成土壤侵蚀的抵抗能力明显得到改善。其中雨强为 60 mm/h 时的减沙效果最为显著, TM, TSM 和 S 坡面与 CT 坡面相比,产沙量分别减少了 94.17%,89.13%和 98.84%。雨强为 90 mm/h 时, TSM 和 S 坡面的减沙效果明显减弱,与 CT 坡面相比,分别减少了 6.78%和 30.53%;而 TM 坡面减沙效果则相对较好,与 CT 坡面相比产沙量减少了 53.76%。当雨强达到 120 mm/h 时, TM 坡面的减沙效果最为理想,与 CT 坡面相比产沙量减少了 74.88%;S 坡面与 CT 坡面相比产沙量减少了 18.00%;TSM 坡面与 CT 坡面相比产沙量反而增加了 5.09%。TS 坡面仅在雨强为 60 mm/h 时与 CT 坡面相比,产沙量减少了 24.92%,在其他两个雨强下产沙量明显增加,由此可见,采用 TS 坡面来复垦铁尾矿砂的效果并不理想。

综上所述,单纯考虑减沙效果,不同复垦坡面的减沙效果因基质的不同存在一定的差异,综合考虑不同雨强下的减沙效果, TM 坡面是复垦铁尾矿砂的最优选择。

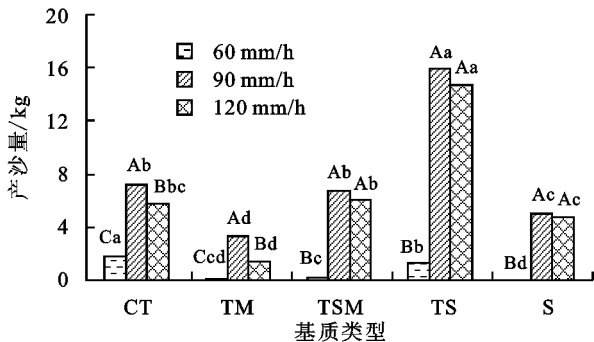


图 3 不同雨强与基质类型条件下复垦坡面的产沙量对比

### 3 讨论

#### 3.1 复垦坡面产流产沙的影响因素

影响坡面产流产沙的影响因素众多<sup>[13-15]</sup>,除本文涉及到的坡度、雨强及坡面基质,如土壤特性<sup>[16-17]</sup>、地

表状况<sup>[18-19]</sup>、土壤管理措施<sup>[20-21]</sup>等因素亦会对坡面产流产沙形成影响。但目前有关坡面产流产沙影响因素的研究主要考虑雨强及坡度对其的影响,这是因为降雨是影响坡面产流产沙的主要因素<sup>[15]</sup>,坡度是坡面产流产沙的重要因素<sup>[22]</sup>。就试验区铁尾矿砂的实际情况而言,只是单纯铁尾矿砂的堆放,要对其实施复垦,如何削减高强度降雨以及坡度的影响是首要问题。因此本文研究坡面产流产沙主要采用的是过程化理想模型,单纯考虑引起产流产沙的主要因素而忽略了次要因素的作用,要保证铁尾矿砂复垦的良好效果,后期不仅要考虑主要因素的影响,同时需要兼顾次要因素的作用,因此很有必要进一步综合研究多个影响因素对产流产沙的共同作用。

#### 3.2 TM 复垦坡面复垦材料的最佳配比方案

研究结果表明, TM 复垦坡面相较其他复垦基质坡面减沙效果更明显,但在本试验中采用的菌糠是未经发酵处理,试验设计中仅采用了有限配比中一种相对理想的复垦材料配比方案,牟信刚<sup>[23]</sup>利用不同材料配比配制 64 种基质,通过土壤理化性质指标筛选较为适宜的基质配方,再根据植物生长情况进一步选择最佳边坡绿化基质,这意味着改变原材料的配比方案, TM 复垦坡面的水土流失情况可能得到更进一步的改善。众多研究证明,菌糠具有较强的吸水能力,且发酵过后的菌糠会增加土壤的有机质含量<sup>[24]</sup>,有机质会增加土壤中的腐殖质,腐殖质是形成水稳性团聚体的重要胶结物质,有助于形成良好的土壤结构,从而影响坡面的产流产沙<sup>[25]</sup>。合适的菌糠配比必然会对改善铁尾矿砂复垦坡面水土流失起到至关重要的作用,这需要对不同配比复垦坡面减流减沙成效做进一步地研究分析。

#### 3.3 TM 复垦坡面减流效果改善处理

本文通过对不同复垦基质坡面产流产沙的对比分析,得知 TM 坡面与铁尾矿砂裸坡相比,减沙效果相当显著,但是减流效果并不明显。出现这样的情况主要在于未发酵的菌糠会导致坡面入渗性减小,导致保水能力较差,复垦铁尾矿库以期减少甚至避免水土流失,保水与保土同等重要,在 TM 坡面减沙效果良好的基础上,通过对坡面基质物理性状的改变,增强复垦基质的保水性,只有这样才能为后期恢复生态提供基本的环境条件。聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)作为一种防治水土流失常用的化学处理物质<sup>[26]</sup>,可以在一定程度上改善铁尾矿砂的物理性状,对于铁尾矿砂的保水性具有一定的改善<sup>[27]</sup>。利用 PAM 对 TM 复垦坡面进行处理或采用其他保水物质改善复垦基质的物理性状,进一步研究复垦坡面的保水性,以达到改善坡面减流效果的目的。

## 4 结论

(1) 当雨强、坡度和基质类型三者共同作用时,坡面产流产沙受雨强的影响程度最大,坡度次之,基质类型的影响程度相对最弱。

(2) 在雨强和坡度的同时作用下,坡面产流随雨强和坡度的增大均呈现逐渐增大的趋势,其中雨强对坡面产流影响较为显著,随着雨强的增大,因雨强作为坡面产流的主导因素,会出现掩盖坡度对坡面产流影响的现象;坡面产沙随着雨强的增大基本呈现递增趋势,且坡度越大,坡面产沙率的增幅越大,雨强和坡度对坡面产沙影响均较显著,就铁尾矿砂堆存实际情况且结合研究结果与分析,试验设计坡度值中减少坡面侵蚀的最理想复垦坡度为  $25^{\circ}$ 。

(3) 在复垦设计坡度  $25^{\circ}$  条件下,就减流效果而言,不同基质类型复垦坡面间减流规律相似,随着雨强的增大减流效果逐渐消失,不同类型复垦坡面减流效果差别甚微;单纯考虑减沙效果,不同复垦坡面的减沙效果因基质的不同存在一定的差异,综合考虑不同雨强下的减沙效果,TM 坡面是复垦铁尾矿砂的最优选择。

### 参考文献:

- [1] 李玉凤,包景岭,张锦瑞. 铁尾矿资源开发利用现状分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(11): 77-81.
- [2] 张锦瑞. 论铁尾矿的资源化[J]. 资源开发与市场, 1999, 15(2): 89-90.
- [3] 秦静,王永生. 我国矿业开采带来的环境问题及其土地复垦[J]. 中国国土资源经济, 2009, 22(1): 18-20.
- [4] 黄勇刚. 我国铁尾矿资源的利用现状及展望[J]. 资源与产业, 2013, 15(3): 40-44.
- [5] Wu L, Peng M, Qiao S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil[J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2018, 25(4): 1-8.
- [6] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. The characteristics of rill development and their effects on runoff and sediment yield under different slope gradients[J]. 山地科学学报(英文), 2016, 13(3): 397-404.
- [7] Qian F, Cheng D, Ding W, et al. Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2016, 64(3): 237-245.
- [8] Chen H, Yang J, Fu W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 121-126.

- [9] 蒋荣,张兴奇,纪启芳,等. 坡度和雨强对喀斯特地区坡面产流产沙的影响[J]. 环境保护科学, 2012, 38(5): 13-17.
- [10] He J J, Cai Q G, Liu S B. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1263-1268.
- [11] 代数,蒋光毅,吴清,等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1-5.
- [12] 彭旭东,戴全厚,李昌兰,等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
- [13] 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.
- [14] 黄俊,赵西宁,吴普特. 基于通径分析和灰色关联理论的坡面产流产沙影响因子分析[J]. 工程科学与技术, 2012, 44(5): 64-70.
- [15] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京:中国林业出版社, 2000.
- [16] 周宁,李超,琚存勇,等. 黑龙江省土壤可蚀性  $K$  值特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 182-189.
- [17] 孙龙,张光辉,王兵,等. 黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 191-197.
- [18] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等. 草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 119-125.
- [19] 肖继兵,孙占祥,刘志,等. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 159-166.
- [20] 常松果,胡雪琴,史东梅,等. 不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 34-40.
- [21] 李晓原,张文太,李建贵,等. 伊犁河谷 5 种土壤管理措施减流减沙效果分析[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(3): 51-57.
- [22] 刘青泉,陈力,李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(5): 449-457.
- [23] 牟信刚. 护坡绿化基质筛选及其理化性质研究[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2008.
- [24] 张晓君,杨胜香,段纯,等. 蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 526-531.
- [25] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1): 123-145.
- [26] 员学锋,汪有科,吴普特,等. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 37-40.
- [27] 吕春娟,毕如田,陈卫国,等. 土壤结构调理剂 PAM 对复垦铁尾矿砂物理性状的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 240-245.