降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响

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：采用室内人工模拟降雨技术，研究短历时暴雨和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响。结果表明：(1)不同降雨强度条件下，不同坡度间的坡面径流量、产沙量及径流泥沙含量均呈现随着降雨历时的增加而增加的动态变化趋势，不同的是径流量在 15～24 min 后逐渐趋于稳定。(2)不同降雨强度条件下，裸露铁尾矿砂坡面径流量与产沙量与坡度相关关系均存在临界降雨强度，该临界降雨强度约为 90 mm/h。(3)不同降雨强度条件下，不同坡度间的产沙量及径流泥沙含量随着降雨强度的增加，二者与坡度的关系均由负相关逐渐转变为正相关。(4)当降雨强度从 60 mm/h 增加到 120 mm/h 的过程中，不同坡度条件下的径流量及产沙量与降雨强度总体上呈逐渐上升的趋势，局部存在特殊情况。当坡度从 25°增加到 35°的过程中，不同降雨强度条件下的径流量及产沙量与坡度的关系均不明显；但同一坡度条件下，随着降雨强度的增加，径流量和产沙量均逐渐增加。研究成果为揭示降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂产流产沙机理提供参考。

关键词：铁尾矿砂；裸露坡面；降雨强度；坡度；产流产沙

中图分类号：S157.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2019)02-0023-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.004

Effects of Rainfall Intensities and Slope Gradients on Runoff and Sediment Yield on Bare Iron Tailings Sand Slope

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

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

Abstract: Effects of short-duration rainstorm and slope gradients on the runoff and sediment yield were studied in bare iron tailings slope using the indoor artificial rainfall simulation method. The results showed that: (1) Under different rainfall intensities, the runoff, sediment yield, and runoff sediment content of different slope gradients show a dynamic trend with the increase of rainfall duration. The difference was that the runoff gradually stabilizes after 15～24 minutes. (2) Under different rainfall intensities, the relationship between runoff, sediment yield, and slope gradients of bare iron tailings slope had a critical rainfall intensity, and the range of this critical rainfall intensity was about 90 mm/h, and the range value of specific critical rainfall intensity needed further studies and determination. (3) Under different rainfall intensities, the sediment yield and runoff sediment content between different slope gradients increased with the rainfall intensity, and the relationship between them and slope gradually changed from negative correlation to positive correlation. (4) When the rainfall intensity increased from 60 mm/h to 120 mm/h, the runoff and sediment yield with rainfall intensity under different slope conditions showed a generally gradual upward trend, and there were local special cases. When the slope increased from 25° to 35°, the relationship between runoff and sediment yield under different rainfall intensities was not obvious; but under the same slope gradient condition, the runoff and sediment yield basically increased with the increase of rainfall intensity. The research results provide reference for the study on the mechanism of rainfall intensity and slope on the abortion sand production of bare iron tailings.

Keywords: iron tailings sand; bare slope; rainfall intensity; slope gradients; runoff and sediment yield

收稿日期：2018-09-07

资助项目：国家青年科学基金项目(41401619)；山西农业大学引进人才科研启动项目(2014ZZ07)

第一作者：郭星星(1990—)，男，在读硕士研究生，主要从事土壤侵蚀与土地整治研究。E-mail：gxxhebei@163.com

通信作者：吕春娟(1978—)，女，博士，副教授，主要从事土壤侵蚀与土地整治研究。E-mail：lcjcwg@126.com

固体废弃物是全球重大环境问题之一，我国固体废弃物的数量高居不下，固体废弃物中工业固体废弃物的占比较高，而铁尾矿是工业固体废弃物的主要组成部分[1]。铁尾矿的产量巨大，占用大量的土地资源，其主要以露天堆存的方式处理[2-3]。由于铁尾矿砂结构较为松散，整体颗粒结构间孔隙度较大，若逢降雨，铁尾矿砂中有害物质随径流渗入农田土壤，影响农田土质，造成减产；有害物质及大量尾矿砂经雨水的冲刷进入附近河道，严重影响水系的生态平衡，给流域居民造成一定影响；铁尾矿砂的长期露天堆存不仅引发巨大的生态问题，同时造成严重的经济和社会影响[3-5]。因此，探究铁尾矿砂的水土流失特征，不仅对缓解工业固体废弃物污染具有重要意义，而且具有一定的生态、经济和社会效益。

降雨是水力侵蚀的先决条件，水力侵蚀的强度取决于土壤特性、地形状况、降雨特征及植被情况等，其中降雨强度是最重要的自然因素，坡度是重要的坡面因子。国内外在相关方面做了大量研究，就降雨强度和坡度对坡面产流产沙规律的影响取得了一定的研究成果。大量研究[6-7]表明，在一定条件下，产流产沙随着降雨强度和坡度的增大而增大；也有部分研究[8-9]表明，对产流产沙的影响中存在临界坡度，产流产沙趋势在临界坡度两端呈现截然不同的规律。但由于试验环境和试验条件的差异，所得到的坡面产流产沙规律及临界坡度等结论只有相似却并无一致论断。当前主要采用室内人工模拟降雨技术[10-11]或野外径流小区[12-13]的方法研究坡面产流产沙规律，且研究对象主要集中于坡耕地的水土流失方向，Liu 等[14]研究降雨强度和坡度对盐碱土的泥沙流失和飞溅影响，结果发现坡度和降雨强度对泥沙淤积、径流和飞溅的影响之间相互关联；代数等[15]研究不同坡度和降雨强度对黄壤旱坡地的产流产沙影响及响应过程，得到侵蚀量与坡度符合二次抛物线关系，径流量与产沙量均与雨强呈幂函数关系。但因土壤类型、土壤物理与化学性质、降雨强度、坡度及土壤管理措施等的不同，导致研究结果存在较大的差异与分歧。而铁尾矿砂与坡耕地土壤在性质上有较大的差异，且与坡耕地相比少了人为因素的干扰，其在降雨条件下的产流产沙规律必然与以往的研究存在较大的区别。当前对铁尾矿砂坡面产流产沙方面的研究却少有报道。综上所述，设计多种坡度和多种降雨强度组合来研究其对铁尾矿砂坡面的产流产沙具有重要的现实意义。故而，本研究选取干排铁尾矿砂为研究对象，利用室内人工模拟降雨技术，研究降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响，对于铁尾矿固体废弃物污染的治理及铁尾矿区的复垦具有科学理论意义与实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验所用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)，该地区属于温带大陆性季风气候，年均气温 13.5 ℃，年均降水量 631 mm，季节分布不均，主要集中在 6—8 月，且短历时暴雨较为频发，这里降雨受地形影响较大，情况较为复杂。研究区铁尾矿砂容重 1.65 g/cm^3，初始体积含水量 8%。参照国际制土壤质地分类标准，铁尾矿砂机械组成为砂粒含量 14.43%，粉粒含量 35.95%，黏粒含量 46.62%。研究区铁尾矿库矿砂表面无植被生长。

1.2 试验设计

人工模拟降雨试验在山西农业大学资源环境学院实验站进行。本研究考虑坡度、降雨强度和土层特征等多种因素，主要研究短历时暴雨对裸露铁尾矿砂坡面侵蚀影响的演变情况。根据调查发现，干排铁尾矿库区铁尾矿砂的实际堆存坡度基本为 25°～35°，为真实模拟实际情况，且考虑到之后铁尾矿砂裸坡复垦工程量的问题，尽量在原坡度条件下进行试验研究，故试验设计坡度分别为 25°，30°和 35°，通过分层装填的方法将土槽内铁尾矿砂装填至设计坡度。综合考虑当地近年极端降雨的情况及由《中国暴雨统计参数图集(2006 版)》得到山西省 60 min 暴雨雨强范围集中于 60～120 mm/h，同时结合张汉雄[16]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，因此设计降雨强度为 60，90，120 mm/h 3 种雨强，分别模拟普通暴雨、中型暴雨和大型暴雨。通过对野外干排铁尾矿库区铁尾矿砂堆积坡面的调查研究，综合考虑干排铁尾矿库区铁尾矿砂在短历时降雨条件下水土流失及降雨入渗深度等情况，为尽可能地在室内通过土槽模拟野外真实环境，将室内模拟坡面的土层厚度定为 60 cm，其中基底层为 40 cm，侵蚀层为 20 cm，具体坡面土壤压实情况参照野外实测平均容重设计。试验土槽采用自行设计的倾斜式混凝土土槽，其规格为：长 2 m，宽 1 m，高 0.6～2.3 m，土壤坡面装填坡度可变范围为 0～40°，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。首先通过分层装填的方式将铁尾矿砂装填至土槽中，每 5 cm 为 1 层，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的影响[17]。

模拟降雨设备采用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。该人工模拟降雨器可分为 3 大部分:降雨系统、控制系统和供水系统。模拟降雨器高度为 4 m,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>80%,满足模拟天然降雨特征的条件,基本可模拟野外降雨的实际环境。降雨开始前用水分测定仪测定坡面体积含水率,确保在降雨试验前所有处理的体积含水量一致,保持在 8%左右。因研究的降雨类型为短历时暴雨,故降雨时长设计为 30 min。降雨开始后,以坡面产流为时间节点开始计时,每隔 3 min 用径流桶收集 1 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,通过计算得到径流量。对于同一坡度的铁尾矿砂裸坡,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 的侵蚀层,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。每个处理重复 3 次,共进行 27 次降雨。

1.3　数据分析

研究中的试验数据分析、处理及直观反映数据变化趋势的图表均利用 Excel 软件处理完成。因本文主要分析短历时降雨条件下的产流,故忽略因蒸发等情况造成坡面降雨量的损失,降落到坡面的降雨主要有 2 种去向:一部分在降雨历时中渗入坡面,即入渗量;另一部分因过剩入渗或饱和入渗形成的坡面径流,即径流量。本研究中涉及到的坡面入渗量由坡面降雨量减去坡面径流量求得。

2　结果与分析

降雨强度和坡度是坡面产流产沙的主要影响因素,其中降雨强度是土壤侵蚀的主要驱动因素,坡度是影响径流侵蚀的重要地貌特征之一。通过室内人工模拟降雨试验得到的试验数据,分析产流产沙对降雨强度和坡度的响应情况。

2.1　铁尾矿砂坡面径流量动态变化规律

从图 1 可以看出,不同降雨强度条件下不同坡度间的径流量随着降雨历时的增加而增加,并逐渐趋于稳定,在降雨历时 15～24 min 以后径流量基本趋于稳定。由于降雨历时是以坡面开始产流为时间节点计时,所以在试验初始降雨量就已经超过坡面入渗量,随着降雨持续时间的增加,坡面由入渗过剩的状态逐渐转变为饱和过剩,故坡面径流量的动态变化趋势基本为先增加,然后逐渐趋于稳定的情况。

坡面不同坡度下的径流量随着降雨强度的增加而增加,而坡度对径流量的影响特征则较为特殊。当降雨强度依次增加 30 mm/h 时,同一降雨强度下不同坡度间的径流量差值先减小后增大。3 种坡度(25°,30°,35°)下,当降雨强度为 60 mm/h 时,不同坡度条件下的径流量随着坡度的增加而逐渐减小,累积径流量分别为 40.24,31.91,22.37 L;当降雨强度为 90 mm/h 时,不同坡度条件下的径流量差值相对缩小,径流量值大小相当,累积径流量分别为 58.80,65.50,62.35 L;降雨强度为 120 mm/h 时,随着坡度的增加不同坡度条件下的径流量逐渐增大,累积径流量分别为 57.50,78.00,86.80 L。由此可见,不同降雨强度条件下裸露铁尾矿砂坡面径流量与坡度相关关系存在临界降雨强度,当降雨强度大于临界降雨强度,坡面径流量随着坡度的增加而增加,即坡度与径流量成正相关;反之,当降雨强度小于临界降雨强度,坡面径流量随着坡度的增加而减小,即坡度与径流量成负相关。该临界降雨强度的范围在 90 mm/h 左右,具体临界降雨强度的数值有待进一步的研究确定。

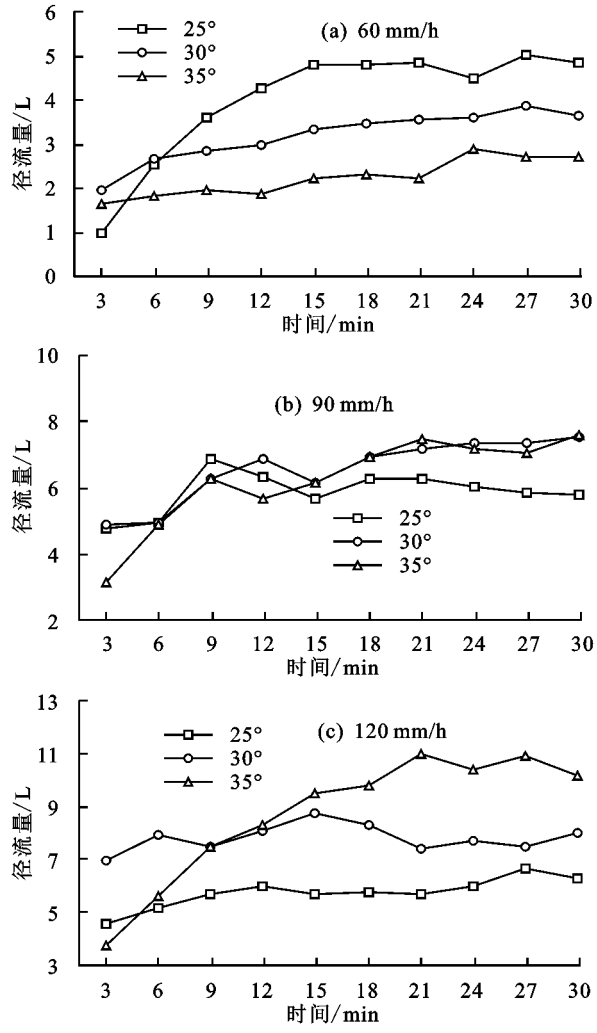

图 1　不同降雨强度下不同坡度间的径流量动态变化

从图 2 可以看出,不同降雨强度条件下,径流量与入渗量占比随着坡度的变化规律不尽相同。在 60 mm/h 降雨强度条件下,3 种坡度(25°,30°,35°)下径

流量所占百分比分别为 61%,46%和 31%,随着坡度的增加而减小;在 90 mm/h 降雨强度条件下,不同坡度下径流量所占百分比分别为 59%,63%和 57%,随着坡度的增加先增加后减小;在 120 mm/h 降雨强度条件下,不同坡度下径流量所占百分比分别为 44%,57%和 59%,随着降雨强度的增加而增加。对于坡面入渗量而言,其变化规律与之相反,这也再次从坡面入渗的角度验证不同坡度条件下裸露铁尾矿砂坡面存在临界降雨强度的观点。

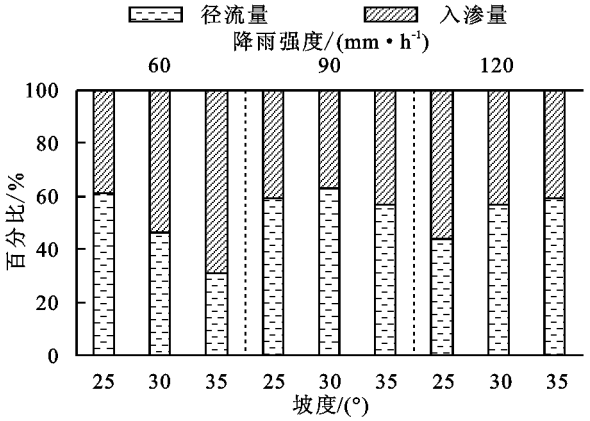

图 2 不同降雨强度条件下不同坡度间径流量与入渗量占比

2.2 铁尾矿砂坡面产沙量动态变化规律

从图 3 可以看出,不同降雨强度下不同坡度的产沙量整体动态变化趋势基本一致,产沙量均随着降雨持续时间的增加而增加,最终趋于稳定。一般情况下,在其他条件一致时,产沙量随坡度的增加而增加,如 Wu 等[6]研究坡度和降雨强度对黄土高原裸坡产流产沙动态影响时的研究结果表明,侵蚀量随坡度的增大而增大。但图 3 中不同降雨强度下不同坡度间的产沙量关系有所差异,当降雨强度为 60 mm/h 时,不同坡度下的产沙量均以不同的速率增长,但坡度与产沙量呈负相关;由图 2 可知随着坡度的增大坡面入渗率逐渐增大,反之坡面径流量则相应的减小,坡面径流是决定泥沙输移的关键,径流量减小意味着泥沙输移能力的降低,与之对应的是产沙量的减小。当降雨强度为 90 mm/h 时,降雨前期不同坡度间的产沙量差异并不明显,随着降雨持续时间的增加,坡度对产沙量的影响开始突显。当降雨强度为 120 mm/h 时,坡度对产沙量的影响更加明显,由于此时降雨强度相对较大,则径流量较大,坡面产流迅速形成,加之因坡度增大坡面向下的重力分量也随之增大,致使径流流速增加,从而加强对坡面的侵蚀力,出现产沙量与坡度呈正相关的现象。坡度是坡面土壤侵蚀的重要影响因素,坡面径流是泥沙输移过程的决定因素。不同降雨强度条件下径流量与坡度相关关系存在临界降雨强度,受径流侵蚀的影响,不同降雨强度条件下产沙量与坡度相关关系亦存在临界降雨强度。

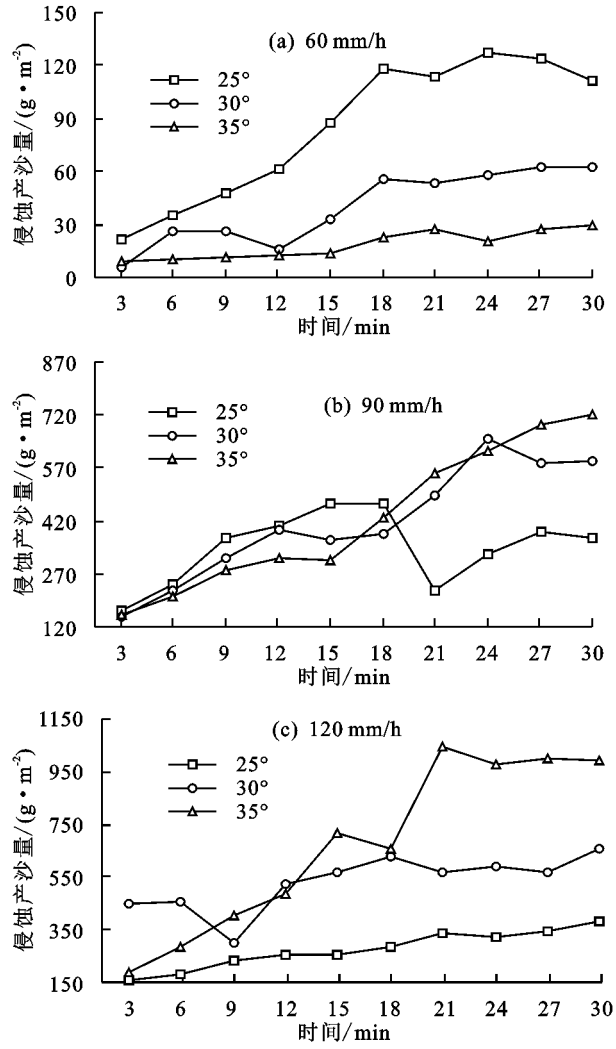

图 3 不同降雨强度下不同坡度间侵蚀产沙量动态变化

径流泥沙含量是土壤侵蚀程度的一个重要指标,从图 4 可以看出,不同降雨强度不同坡度间的径流泥沙含量呈先增加后逐渐稳定的趋势。当降雨强度为 60 mm/h 时,不同坡度(25°,30°,35°)间的平均径流泥沙含量分别为 43.10,26.02,18.42 g/L,差值相对明显,其动态变化特征表现为径流泥沙含量与坡度成负相关;结合试验过程的观测,在裸露铁尾矿砂坡面上有较为明显结构性结皮形成的现象,且随着坡度的增大该现象逐渐趋于消失,分析其原因可能是由于结构性结皮对坡面径流及土壤侵蚀造成一定的影响所致。当降雨强度为 90 mm/h 时,降雨前期径流泥沙含量相差不大,随着降雨持续时间的增加,坡度较大坡面的径流泥沙含量迅速增加。这是因为此时随着降雨强度的增大,径流量相应增大,雨滴溅蚀能力增强,在降雨初期由于坡面表层的土壤颗粒较为疏松,所以不同坡度下的径流泥沙含量相差不大,随着降雨持续时间的延长,表层疏松土壤流失殆尽,坡度对径流侵蚀力的影响开始体现,坡度越大径流侵蚀力越强,造成土壤侵蚀越严重,相应地径流泥沙含量也越大。当降雨强度为 120 mm/h 时,坡度对径流侵蚀的

影响作用愈加明显,不同坡度(25°,30°,35°)间的平均径流泥沙含量分别为 98.94,149.43,168.82 g/L,与坡度呈明显的正相关。

2.3　不同降雨强度和坡度下产流产沙总趋势分析

从图 5a 可以看出,坡度从 25°～35°变化过程中,产流产沙量趋势均不明显。但同一坡度条件下,径流量和产沙量基本都随降雨强度的增加而增加。在 25°坡度条件下,当降雨强度从 90 mm/h 增大到 120 mm/h 时,径流量稍有降低,且产沙量有一定程度的减少。由于此时坡度相对较缓,且结合试验过程观测,在 90 mm/h 的降雨强度下,坡面有结构性结皮形成的现象,但由于降雨强度较大,在降雨过程中结皮在不断地形成与破坏,并无减沙效果,相反会加重侵蚀程度,且明显阻滞降雨的入渗,该试验结果与陈琴娟等[18]在王家沟流域坡耕地上的试验结果一致。在结皮被打破的情况下,产流量和产沙量仍旧很高,结皮对减流减沙并无贡献率。当降雨强度为 120 mm/h 时,由于雨滴的溅蚀强度增大,结构性结皮被破坏,坡面入渗加强,导致坡面径流量减小,产沙量也相应有所降低。

从图 5b 可以看出,降雨强度从 60 mm/h 增加到 120 mm/h 过程中,产流产沙量总体呈上升趋势,但在局部存在一些特殊现象。在降雨强度为 60 mm/h 时,产流产沙均出现减少的趋势,结合上文对径流量和产沙量的分析,出现该现象的主要原因可能在于土壤结构性结皮对坡面入渗的影响。结合图 2 可知,随着坡度的增大降雨入渗比例明显增加,导致径流相对减小,同时径流携带泥沙的能力下降,坡面产沙量也有所下降,进而坡面侵蚀程度有所缓解,这也解释了产流产沙局部出现减少趋势的现象。

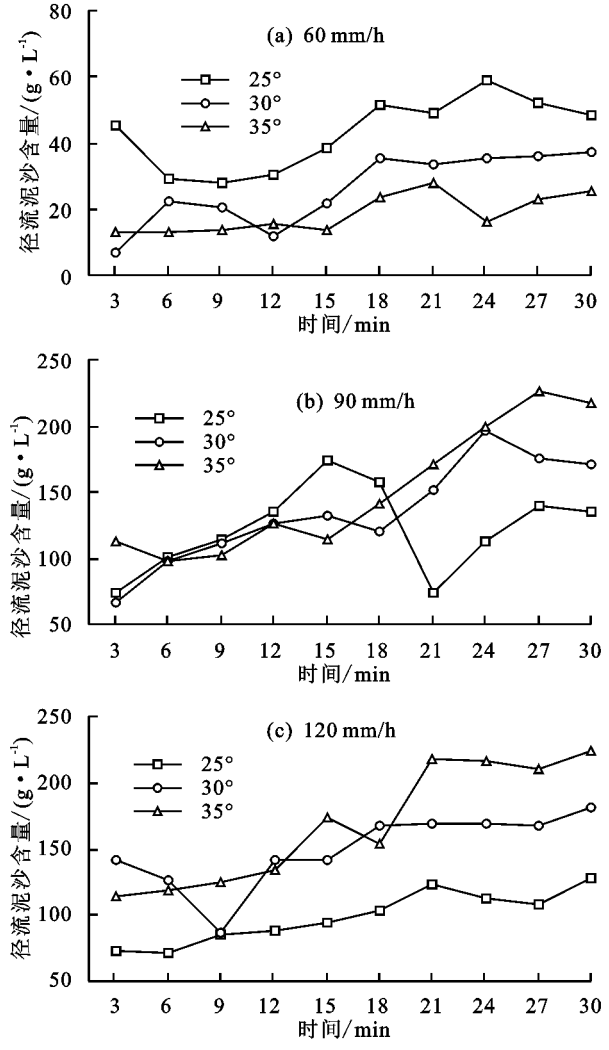

图 4　不同降雨强度下不同坡度间的径流含沙量动态变化

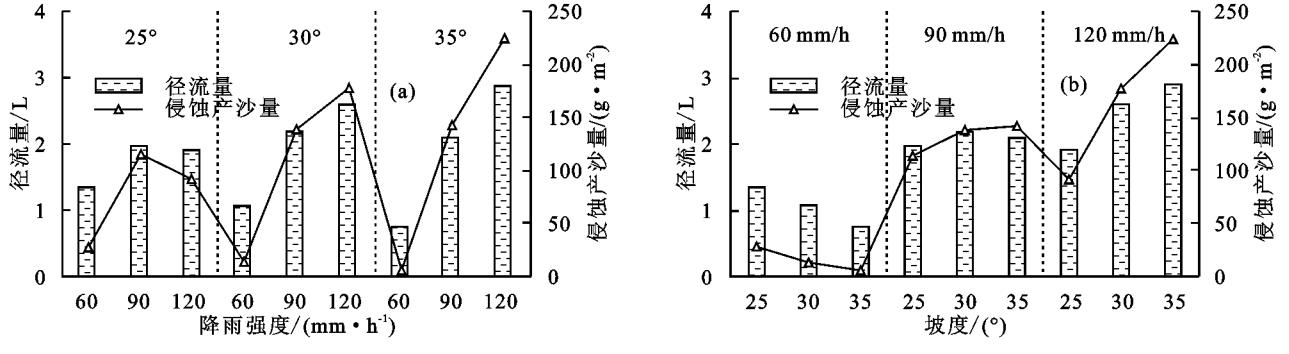

图 5　不同降雨强度和不同坡度下径流量与侵蚀产沙量变化总趋势

3　讨 论

3.1　铁尾矿砂坡面径流量

裸露铁尾矿砂坡面在初始体积含水量等因素相近的情况下,随着降雨强度的增加,坡度与径流量之间的相关关系由负相关逐渐变为正相关(图 1),可见两者相关关系转变过程中存在临界降雨强度。当径流量和入渗量的比例相对数值发生改变,在降雨强度为 60 mm/h 条件下,随着坡度的增大径流量呈减小趋势,王秀英等[19]在陕西绥德黄土高原研究不同坡度耕地水土流失及土壤侵蚀,也得到相同的结论。结合试验过程分析,其更深层次的原因可能与结构性结皮的形成有关。当坡度较小时,因雨滴对坡面的击打作用较易形成结构性结皮,且此时降雨强度相对较小,径流流速相对缓慢,被分散的细小颗粒更容易随水分入渗进入下层土壤,促进结构性结皮的形成,从而导致入渗量在一定程度上有所减小。相反,随着坡度增大,雨滴对坡面的击打作用有所减弱,但同时径

流流速增大,导致被分散的铁尾矿砂细小颗粒迅速被径流携带离开坡面,不利于结构性结皮的形成,因此入渗量会相应增加。胡尧等[20]在岷江流域红壤坡面研究降雨入渗对产流产沙的影响,也存在类似的原因。当降雨强度增大时,结构性结皮对降雨入渗的影响因形成条件的变差而减弱,甚至消失,此时坡度对降雨入渗的影响较为明显。径流流速的加快使径流迅速离开坡面,相应减小坡面入渗的比例。卫喜国等[21]利用人工模拟降雨研究黑龙江坡耕地降雨入渗,也发现在一定降雨强度下,随着坡度的增大降雨入渗出现减小的趋势。本研究表明,坡面产流产沙结果与坡耕地的研究有一些相似之处,但该结果是建立在铁尾矿砂实际性质基础上得到的,与坡耕地的研究成果有所不同。事实上,坡耕地与铁尾矿砂在土壤容重、土壤结构、土壤孔隙度、抗蚀性及抗冲性等物理性质方面有着巨大的差异,所以针对坡耕地的产流产沙规律并不能反映铁尾矿砂的真实情况,其结论应用于铁尾矿砂上必然存在一定的限制性。

3.2 铁尾矿砂坡面产沙量

根据前文分析,结构性结皮在一定程度上减少坡面入渗,增加坡面径流量。以坡面为研究对象,国内外有关结皮对侵蚀产沙影响的研究具有不同的结论:一种认为土壤结皮具有增加径流、抑制产沙的作用[22];另一种认为土壤结皮的产生会增加产流,径流会加重土壤侵蚀的程度[23-24];还有一种结论为,不同条件下土壤结皮可能增加侵蚀产沙,也可能抑制产沙[25-26]。降雨条件、坡度及物理性质等不同必然导致试验结果出现不同的结论,鉴于裸露铁尾矿砂坡面与坡耕地的土壤性质差异,其结果必然存在一定的差别。根据试验过程的观测,在降雨强度为 60 mm/h 时坡面会形成结构性结皮,且由于降雨强度较大,降雨过程中结皮在不断地破坏与形成,且结皮的面积随坡度的增大而缩小。之所以出现坡度与产沙量成负相关的原因在于:因土壤结皮造成径流量增加的结果导致径流对坡面侵蚀的增强,使土壤结皮对坡面侵蚀起到一定的促进作用,这与高燕等[27]在黑土区坡面的研究结论较为类似,因结皮的破坏导致坡面侵蚀产沙量迅速增加。唐泽军等[28]通过拟合效应率的公式,计算不同雨强下结皮的效应率,也得到土壤结皮的形成会促进侵蚀产沙的结论。综上所述,在该试验因子水平条件下,裸露铁尾矿砂坡面土壤结构性结皮的形成具有减少土壤入渗、增加坡面径流和促进坡面侵蚀的作用。

3.3 有待进一步研究的问题

坡度与坡面径流泥沙形成的关系复杂,坡度的不同影响坡面径流量的大小,坡面径流又决定侵蚀产沙的多少,因此坡度与坡面产流产沙并非简单的正相关或负相关的关系。坡度的变化会影响坡面入渗率、坡面承雨强度、径流侵蚀力、径流输运力、雨滴溅蚀力和土壤结皮的形成[29]等,从而影响坡面侵蚀力和抗侵蚀力。介于铁尾矿砂坡面与坡耕地物理性质的差异性,要想进一步了解降雨强度和坡度对铁尾矿砂坡面产流产沙的影响机理,以后尚需运用坡面水流水动力学和泥沙运动力学等知识在更为微观的层面上做进一步的研究。

4 结 论

(1)不同降雨强度下不同坡度间的坡面径流量动态变化趋势均为径流量随着降雨历时的增加而增加,而后逐渐趋于稳定。不同降雨强度条件下裸露铁尾矿砂坡面径流量及产沙量与坡度的相关关系均存在临界降雨强度,该临界降雨强度的范围在 90 mm/h 左右,具体临界降雨强度的数值有待进一步的研究确定。

(2)不同降雨强度条件下不同坡度间的坡面产沙量动态变化趋势均为产沙量随着降雨历时的增加而增加。径流泥沙含量随着降雨历时的增加均呈先增加后逐渐趋于稳定。随着降雨强度的增加,产沙量及径流泥沙含量与坡度关系均由负相关逐渐转变为正相关。

(3)当降雨强度从 60 mm/h 增加到 120 mm/h 的过程中,不同坡度间的径流量及产沙量与降雨强度总体上均呈逐渐上升的趋势,局部存在特殊情况,当降雨强度为 60 mm/h 时,径流量和产沙量均随着坡度的增加而减小。当坡度从 25°增加到 35°的过程中,不同降雨强度条件下的径流量及产沙量与坡度的关系不明显;但同一坡度条件下,随着降雨强度的增加,径流量和产沙量均逐渐增加。

参考文献:

[1] 魏瑞丽.钢铁工业主要固体废弃物资源化利用的技术现状分析研究[D].西安:西安建筑科技大学,2010.

[2] 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.

[3] Cai S, Yang P. Tailings problems and tailings utilization and treatments in the metal mines[J]. Engineering Science,2000,2(4):89-92.

[4] 杨佐涛.齐大山铁矿尾矿矿砂对环境污染的风洞实验[J].中国沙漠,1992,12(2):53-57.

[5] 田景松.铁尾矿砂混凝土的配制与应用研究[D].北京:清华大学,2010.

[6] 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 Sci-

ence and Pollution Research International,2018,25(4):3480-3487.

[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 and Hydromechanics,2016,64(3):237-245.

[8] 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.

[9] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.

[10] 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]. Journal of Mountain Science, 2016,13(3):397-404.

[11] 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.

[12] Zhao X, Wu P, Chen X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hill slopes in the Loess Plateau of China[J]. Soil Research,2013,51(1):50-58.

[13] Ma Y, Xie H H, Li C. Experimental analysis on runoff and sediment from sloping lands in Karst region [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1073/1076: 1624-1629.

[14] Liu D, She D, Yu S, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J]. Catena, 2015,128:54-62.

[15] 代数,蒋光毅,夏清,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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 程琴娟,蔡强国,廖义善.土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):9-11.

[19] 王秀英,曹文洪,陈东.土壤侵蚀与地表坡度关系研究[J].泥沙研究,1998(2):36-41.

[20] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67.

[21] 卫喜国,严昌荣,魏永霞,等.坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(4):114-116.

[22] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.

[23] Moore D C, Singer M J. Crust formation effects on soil erosion processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990,54(4):1117-1123.

[24] 蔡强国,王贵平,陈永宗.黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M].北京:科学出版社,1998.

[25] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion[J]. Soil Science Society of America Journal,1994,58(1):203-209.

[26] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等.黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J].土壤学报,2009,46(1):16-23.

[27] 高燕,郑粉莉,王彬,等.土壤结皮对黑土区坡面产流产沙的影响[J].水土保持研究,2014,21(4):17-20.

[28] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635.

[29] 倪九派,魏朝富,谢德体,等.坡度对三峡库区紫色土坡面径流侵蚀的影响分析[J].泥沙研究,2009(2):29-33.

(上接第 22 页)

[17] Wang Z, Wu Q J, Wu L, et al. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability[J]. Journal of Hydrology,2000,231/232:265-276.

[18] Doerr S H, Ritsema C J, Dekker L W, et al. Water repellence of soils: New insights and emerging research needs [J]. Hydrological Processes,2007,21(17):2223-2228.

[19] 陈俊英,吴普特,张智韬,等.土壤斥水性对含水率的响应模型研究[J].农业机械学报,2012,43(1):63-67.

[20] 刘畅,陈俊英,张林,等.初始含水率对斥水黏壤土入渗特性的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(4):354-361.

[21] Doerr S H. On standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of an Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2015,23(7):663-668.

[22] 刘春成,李毅,任鑫,等.四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J].农业工程学报,2011,27(5):62-67.

[23] 柴红阳,陈俊英,张林,等.不同斥水程度粘壤土一维入渗特性的试验研究[J].排灌机械工程学报,2018. DOI:10.3969/j.jssn. 1674-8530. 17. 0178.

[24] 邹焱,陈洪松,苏以荣,等.红壤积水入渗及土壤水分再分布规律室内模拟试验研究[J].水土保持学报,2005,19(3):174-177.