

胶东铁路弃土弃渣体产流产沙特征

张荣华¹, 荆莎莎¹, 张洪达², 李欢³, 张春强³, 黎家作³, 刘霞², 张光灿¹

(1. 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 山东农业大学林学院, 山东 泰安, 271018;

2. 南京林业大学林学院, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南方现代林业协同创新中心,

南京 210037; 3. 淮河水利委员会淮河流域水土保持监测中心站, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 通过人工模拟降雨试验, 研究降雨强度和坡度对胶东铁路弃土弃渣体产流产沙的影响。根据青荣铁路沿线降雨和弃土弃渣体堆积特点, 设计3种雨强(20, 40, 60 mm/h)和3个坡度(20°, 30°, 40°)。结果表明: (1) 当降雨强度由20 mm/h增加到60 mm/h, 产流开始时间可缩短11~20 s; 当坡度由20°变化到40°, 产流开始时间可提前17~22 s。 (2) 径流量、产沙率在降雨初期剧增到峰值, 之后径流量逐渐趋于稳定, 而产沙率波动减小后逐渐趋于稳定。 (3) 相同坡度条件下, 雨强40 mm/h下的径流量较20 mm/h时增加37.3%~122.6%, 产沙率约为20 mm/h时的1.5~19.5倍; 而雨强60 mm/h下的径流量较40 mm/h时仅增加19.1%~26.7%, 产沙率仅为40 mm/h时的62.5%~151.8%。 (4) 相同雨强条件下, 坡度对径流量、产沙率的影响存在临界坡度(30°~40°), 径流量、产沙率随坡度的增大先增加后减小。 (5) 弃土弃渣体坡度为30°时坡度对坡面侵蚀量的贡献率大于雨强贡献率; 而40°时雨强贡献率明显超过坡度。研究结果可为胶东半岛区域铁路项目建设期间弃土弃渣体的水土流失监测及防治提供技术支撑。

关键词: 弃土弃渣体; 人工模拟降雨; 降雨强度; 坡度; 土壤侵蚀

中图分类号: 157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0080-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.013

Runoff and Sediment Yield Characteristics on Waste Soil and Slag Formed from Railway Construction in Jiaodong Peninsula Region

ZHANG Ronghua¹, JING Shasha¹, ZHANG Hongda², LI Huan³,

ZHANG Chunqiang³, LI Jiazuo³, LIU Xia², ZHANG Guangcan¹

(1. The Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration of Shandong Province, Forestry College of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 2. Forestry College of Nanjing Forestry University, Jiangsu Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration,

Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037; 3. Water and Soil Conservation Monitoring Center of Huaihe Water Resources Committee of Huaihe Water Resources Commission, Bengbu, Anhui 233001)

Abstract: In order to study the effect of runoff and sediment yield on waste and slag formed from railway construction in Jiaodong Peninsula region, the artificial simulated rainfall experiments were conducted. According to the characteristics of rainfall and waste soil and slag in the study area, three different rainfall intensities with 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h and three slope gradients with 20°, 30°, 40° were designed. The results showed that both rainfall intensity and slope gradient affected initial runoff time, runoff, sediment yield, erosion amount and so on. (1) The initial runoff time decreased by 11~20 s with rainfall intensity increasing from 20 mm/h to 60 mm/h and shortened 17~22 s with the slope changing from 20° to 40°, respectively. (2) The runoff and sediment yield increased sharply to the peak during the early period of rainfall, and then the runoff gradually stabilized and the sediment yield decreased with the fluctuation and finally gradually stabilized. (3) Under the same slope gradient, the runoff in rainfall intensity with 40 mm/h increased 37.3%~122.6% compared with 20 mm/h and sediment yield was 1.5~19.5 times of that in 20 mm/h. However, the runoff in the rainfall intensity with 60 mm/h just increased 19.1%~26.7% compared with 40 mm/h, and the sediment yield was only accounting for 62.5%~151.8% of that in 40 mm/h. (4) Under the same rainfall intensity, the effect of slope gradient on runoff and sediment yield had a critical slope between

收稿日期: 2018-01-11

资助项目: 淮河水利委员会项目“铁路项目水土流失调查与防治效应研究”(SBJ-2014-009); 淮河水利委员会项目“淮河流域国家级重点防治区水土流失动态监测”(HWSBJ201302); 山东省水文局项目“山东省省级重点治理区水土流失动态监测”(SWJ201601)

第一作者: 张荣华(1984—), 女, 山东威海人, 副教授, 主要从事水土保持监测与评价研究。E-mail: zrhua5766@163.com

通信作者: 刘霞(1971—), 女, 山东菏泽人, 教授, 主要从事水土保持监测与评价研究。E-mail: liuxia@njfu.edu.cn

30° and 40°, and the runoff and sediment yield increased first and then decreased with the increase of slope. (5) When the slope gradient was 30°, the contribution of slope gradient to soil erosion was greater than the rainfall intensity, while the contribution of rainfall intensity obviously exceeded the slope gradient at 40°. The results can provide technical support for the soil and water loss monitoring and control during the construction process of the railway project in Jiaodong Peninsula region.

Keywords: waste soil and slag; artificial simulation rainfall; rainfall intensity; slope gradient; soil erosion

近年来,铁路发展迅速,运营里程快速增长,随着高铁“四纵四横”“八纵八横”的推进,我国高铁已迎来发展的新时代。但在高铁的建设过程中,由于挖、填、埋、占、压等对不同扰动方式^[1-3],形成了大量的弃土弃渣。这些弃土弃渣物质组成复杂、自然裸露、缺乏植被、堆积坡度大、土质松散、稳定性差、抗冲抗蚀能力低,已成为当前新增水土流失的主要来源^[4-5]。因此,解决弃土弃渣等工程堆积体的水土流失问题十分迫切。

目前已有国内外学者通过人工模拟降雨^[5-10]、野外放水冲刷^[3,11-13]、径流小区定位观测^[14]等方法,对生产建设项目工程堆积体的土壤侵蚀规律及治理措施防护方面开展了相关研究。在土壤侵蚀规律方面,Dong等^[6]对高速公路的堆积体研究发现,降雨强度、土壤容重与径流率呈正相关关系,而坡度与土壤侵蚀速率呈线性关系,但关系式与农地和矿区堆积体描述不一致。郭明明等^[7]对神府矿区的弃土弃渣体研究发现,产流前期侵蚀变化剧烈,15 min后基本稳定,但35°呈单峰变化过程,40°属多峰多谷型,其侵蚀速率可用降雨强度、坡度等因素的幂函数形式预测。史倩华等^[9]实地调查不同区域不同类型工程堆积体的砾石含量,并以此研究不同砾石含量对产流产沙过程的影响,得出红壤区产流开始时间随降雨强度和砾石含量增大而减小,径流流速和径流率随产流历时呈先上升后趋于稳定,砾石对径流量的影响存在10%的阈值。上述研究表明,降雨强度和坡度对不同堆积体坡面径流产沙的影响存在差异。而针对胶东半岛地区铁路弃土弃渣等工程堆积体土壤侵蚀规律方面的研究还少有报道,尤其是铁路建设过程中弃土弃渣体产流产沙特征的研究不够深入。

鉴于此,本文以胶东半岛地区铁路弃土弃渣体为供试材料,采用人工模拟降雨的方法探索不同降雨强度不同坡度对铁路弃土弃渣体产流产沙的影响,以期胶东地区铁路项目施工期间弃土弃渣体的水土流失规律提供基础数据,也为铁路建设过程中水土流失防控技术的研究提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

胶东半岛地处华北平原东北部沿海地区,山东省

东部,北临渤海、黄海,与辽东半岛相对,东临黄海,与朝鲜半岛和日本列岛隔海相望。青岛至荣成城际铁路连接青岛、烟台、威海地区的主要城市,是胶东半岛城市群的重要联络通道,正线范围为DK34+300柘车河线路所(含)~荣成站(含),全长281.88 km(青岛境内67.18 km,烟台境内148.8 km,威海境内65.9 km),位于东经120°20′—122°25′,北纬36°11′—37°32′。工程于2010年10月施工,2014年12月28日开通试运行。根据山东省省级水土流失重点预防区和重点治理区公告^[15],青荣城际铁路涉及胶东半岛北部省级水土流失重点预防区、双岛—刘公岛省级水土流失重点预防区、昆崙山省级水土流失重点治理区。

铁路沿线地貌类型主要为剥蚀平原、冲洪积平原、丘陵和滨海平原。在青岛境内主要为剥蚀平原、冲洪积平原和局部存在剥蚀残丘,进入烟台境内以丘陵为主,间夹冲洪积平原,烟台至威海过渡区为滨海平原,局部略有起伏,威海境内主要为丘陵,间有丘间宽谷、河谷阶地及小型滨海平原。属暖温带半湿润大陆性季风气候,空气湿润,雨量充沛,温度适中,四季分明。多年平均气温11.6~13.6℃,年降水量560~750 mm,60%集中于夏季,且强度大,常出现暴雨。土壤类型主要为棕壤、中性粗骨土、砂姜黑土、石质土。属暖温带落叶阔叶林,主要植被为黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)等。铁路沿线两侧8 km范围内林草植被覆盖率为23.62%。

1.2 试验设计

1.2.1 降雨观测与设计雨强 降雨是导致土壤侵蚀的动力因素,是地表径流的主要来源。考虑青荣城际铁路工程分为6个标段的建设特点以及沿线地形地貌特征,选取距离线路近、易于固定安装、方便采集、无遮蔽物影响、人为扰动少的地点,安装自记雨量计,观测2014—2016年降雨量。在各标段布设1处,共6处自记雨量计,分布在青岛、烟台、威海境内各2处。采样间隔设为15 min,最小分度为0.1 mm。

按照刘震^[16]提出的侵蚀性降雨标准,研究区在观测时段内共发生15场侵蚀性降雨,分布在6—9月。这15场侵蚀性降雨的次降雨量集中在12~60 mm,最大次降雨量发生在2014年7月24-25日,达

204.3 mm。降雨强度主要分布在 16~60 mm/h,最大降雨强度为 62.7 mm/h,发生在 2015 年 8 月 21 日。因此,本研究模拟降雨试验的设计雨强为 20, 40, 60 mm/h。

1.2.2 弃土弃渣体观测与设计坡度 根据高分辨率遥感影像,结合资料分析,统计青荣城际铁路弃土(渣)场数量与面积,解译原地貌类型,估算土壤侵蚀背景值;采用坡度仪、激光测距仪,测量弃土(渣)场坡度、高度,获取弃土弃渣体基本情况。

通过 32 个弃土(渣)场实地观测,结合遥感解译,原地貌以荒草地为主。堆积体主要来源于路基、站场、桥梁涵洞、隧道等开挖形成的弃土、弃石、弃渣等。物质组成种类复杂,以砾石、碎石、中性粗骨土为主,粒径差异大,疏松多孔,稳定性差,抗蚀力低,易发生侵蚀。弃土弃渣体堆积高度主要分布在 7~26 m,坡度集中在 20°~35°,最大坡度为 38.2°。因此,本研究模拟降雨试验的设计坡度为 20°,30°,40°。

1.3 模拟降雨试验

模拟降雨试验于 2016 年 7—8 月在山东农业大学人工降雨大厅进行。人工模拟降雨系统设备型号 QYJY-503,利用垂直旋转下喷式喷头模拟降雨。下喷区雨强连续变化范围在 12~200 mm/h,侧喷区在 20~300 mm/h,降雨调节精度为 7 mm/h,降雨均匀度>0.8,降雨强度变化调节时间<30 s。试验采用规格为长 2 m、宽 1 m、高 0.5 m 的便携式可变坡钢槽。

供试材料来源于青荣铁路弃土(渣)场。由于弃土弃渣体堆高在 4.5 m 以上,因此填土时于槽底铺 5 cm 细沙,保证土槽具有良好的透水性。细沙之上填充 25 cm 土层,采用分 5 层方式,边填充边压实,各层间做打毛处理。表层 20 cm 不压实,以模拟弃土弃渣体松散表面。填土结束后,采用环刀法测定土壤容重,采用烘干法测定前期含水量。

参考自然降雨历时和各降雨强度下的侵蚀状况,确定模拟降雨历时为 60 min,共进行 9 场降雨试验。每场降雨试验前,测定并控制容重在 $(1.2 \pm 1.0) \text{g/cm}^3$,前期含水量在 $(20 \pm 1.0)\%$,使降雨前下垫面处理保持一致。

正式降雨开始后观察坡面产流情况,记录产流开始时间。为反映产沙率的变化过程,在可变坡钢槽的集流槽下方放置一个 5 L 的带有刻度的塑料桶,坡面水流流到集流槽出口时立刻记录产流时间。产流开始后前 5 min 每隔 1 min 用 500 mL 塑料桶收集径流泥沙样,之后每隔 5 min 采集 1 次,采集时间为 1 min,且保证不同可变坡钢槽的收集时间一致,直至降雨结束。

降雨结束后,称量塑料桶内的浑水重。将径流泥沙样静置,倒掉上清液,采用烘干法测量泥沙重量,计算单位时间内的径流、泥沙重量。试验数据、图表制作采用 Excel 2007 软件。

2 结果与分析

2.1 降雨强度和坡度对弃土弃渣体产流过程的影响

2.1.1 产流开始时间 对于一场特定的降雨来说,由于下垫面条件不同,导致产流开始时间有所差异,使得地表径流发生相应的变化,最终引起坡面土壤侵蚀有所不同^[17]。由图 1 可知,在同一降雨强度下,产流开始时间随坡度的增大而缩短,可缩短 17~22 s;在相同坡度下垫面条件下,产流开始时间随降雨强度的增大而缩短,可缩短 11~20 s。整体上,产流开始时间随坡度、降雨强度的增大而减小,呈负相关关系,这与吴发启等^[18]和耿晓东等^[19]的研究结论一致。

但在弃土弃渣体 30°下垫面条件下,产流开始时间并未随降雨强度的增加而一直提前,60 mm/h 雨强下的产流时间略迟于 40 mm/h 雨强,说明产流开始时间与降雨强度并不是呈线性负相关关系,可能由于砾石在胶东地区铁路弃土弃渣体中的分布、土壤入渗性能等引起延迟。

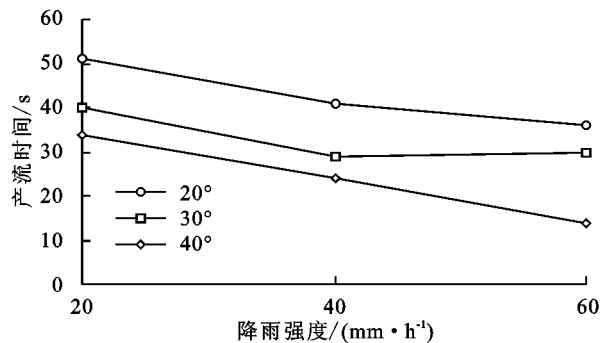


图 1 不同降雨强度下不同坡度弃土弃渣体产流开始时间

2.1.2 坡面径流量变化 在不同降雨强度和不同坡度条件下,坡面径流量随着降雨历时均表现出初期迅速增大,30 min 之后逐渐趋于稳定的变化过程(图 2)。这是由于在降雨初期,弃土弃渣体具有较高的渗透性能,含水量逐渐加大,产流出现后实际入渗率逐步下降,一定时间后达到稳定入渗率,之后降雨成为影响径流的主要因素,大部分降雨形成径流,使径流量趋于稳定^[19]。

在相同坡度条件下,随着降雨强度的增加,径流量呈增加趋势。当雨强从 20 mm/h 增加到 40 mm/h,相同坡度下产生的径流量增加 37.3%~122.6%,尤以 20°增幅明显;当雨强从 40 mm/h 增加到 60 mm/h,径流量仅增加 19.1%~26.7%,逐渐趋于稳定。说明降雨强度的增加对径流量有显著影响,随着降雨强度的增大,入渗率下降,由降雨转化的径流量随之增加。

在相同降雨强度条件下,径流量随坡度的增大呈先增加后减小的趋势,即 30° 弃土弃渣体的径流量最大。说明坡度的增加对径流量的影响较为复杂,一方面坡度越大,坡面径流汇集所需时间越短,越有利于径流的产生;另一方面随着坡度的增加,坡面承雨面积有所减小,导致坡面径流量减小。

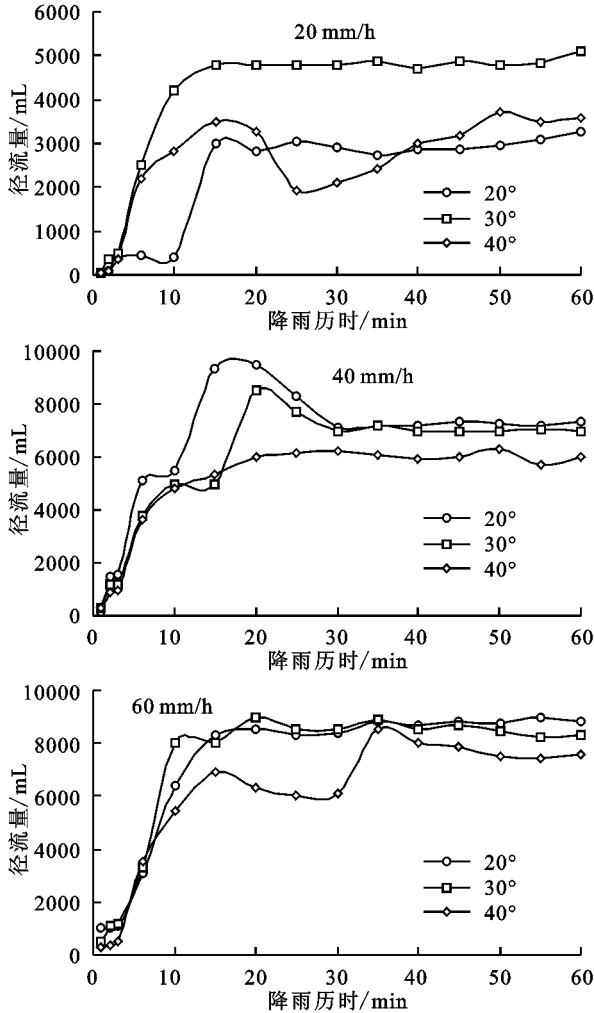


图2 不同降雨条件下弃土弃渣体径流量随时间变化

2.2 降雨强度和坡度对弃土弃渣体产沙过程的影响

2.2.1 产沙率变化 在不同降雨强度和坡度条件下,产沙过程经历突变、波动、稳定3个发展阶段,即产沙率在产流初期剧增到峰值,5~20 min后随产流时间呈波动减小到稳定的趋势(图3),与吴冰等^[20]模拟降雨研究的含砾石土壤产沙过程相似。这是由于在降雨初期,弃土弃渣体表层土质松散,稳定性差,雨滴击溅容易分散表层土体颗粒,被径流冲刷剥离带走,导致产沙率随时间显著增加;而随着降雨的持续,松散颗粒减少,砾石更多地暴露于表面,减小了雨滴对表层的直接击打,减缓了结皮的形成,增大了水流弯曲度和地表粗糙度,在一定程度上延长了径流路径,同时大孔隙增多,使得入渗率增加,径流量减小,含沙率随之减小^[9,21]。

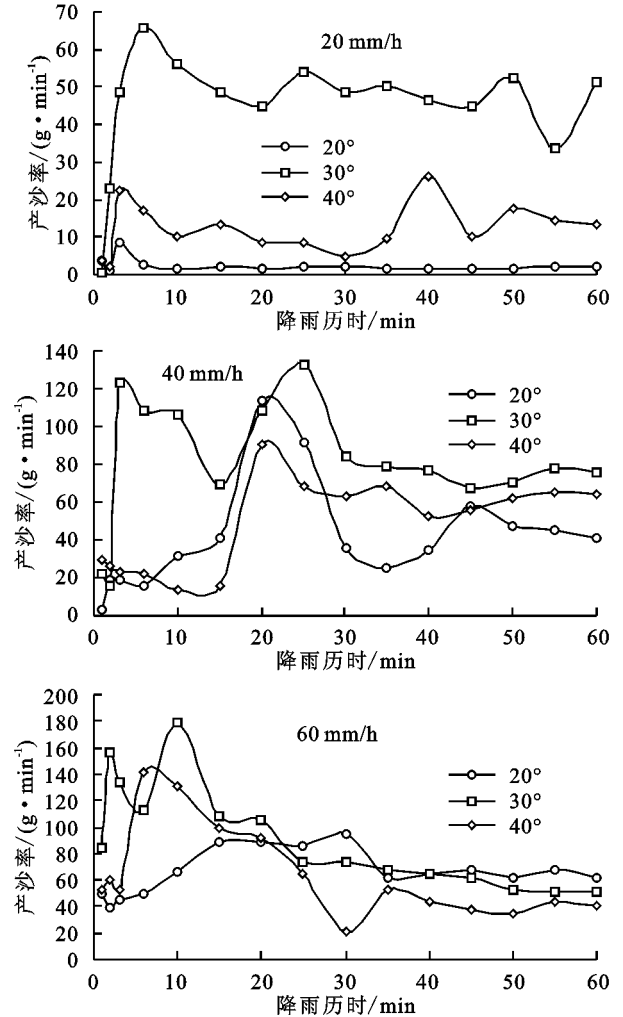


图3 不同降雨强度下弃土弃渣体产沙率随时间变化

产沙率的峰值出现时间在不同降雨强度条件下并不一致。 20 mm/h 雨强时,波峰出现较早,在4~6 min,而 $40,60\text{ mm/h}$ 雨强时,波峰出现较晚,在10~20 min,且随着降雨强度的增大,含沙率的变化幅度也加大。这是由于在坡面侵蚀的发展过程中,降雨强度越大,跌坎出现越早,在产流初期形成了细沟,汇流量加大,径流不断汇入细沟,使细沟侵蚀不断地发展,溯源侵蚀加剧,沟壁甚至出现崩塌^[22],导致含沙率呈较大波动。

在相同坡度条件下,随着降雨强度的增加,产沙率呈增加趋势,雨强 40 mm/h 下的产沙率约为 20 mm/h 下的1.5~19.5倍,尤以 20° 增幅显著,表明降雨强度对产沙率的影响受坡度大小的影响。但持续高强度降雨(60 mm/h),雨强超过下渗率时,雨水降落到坡面来不及下渗就转化成坡面径流^[18],导致产沙率有所降低,仅为 40 mm/h 下的62.5%~151.8%,不同坡度条件下的差异较小。

在相同降雨强度($20,40\text{ mm/h}$)条件下,产沙率随坡度增加先增加后减小,即坡面 30° 时产沙率最大,且在降雨强度为 40 mm/h 时由坡度不同造成的产沙率的差异性变小,波动性增加。当降雨强度为 60 mm/h 时,产沙率在降雨前期随坡度增加而先增加后减小,20 min之后

随坡度增加而减小,且 30 min 后产沙率逐渐平稳,不同坡度条件下的产沙率差异很小。表明坡度对坡面侵蚀的影响受到降雨强度的制约。

2.2.2 坡面总侵蚀量 不同坡度弃土弃渣体在不同降雨强度条件下的侵蚀特征表现不同。由图 4 可知,当下垫面坡度为 20°时,总侵蚀量随着降雨强度的增加而增加;当下垫面坡度为 30°和 40°时,总侵蚀量随着降雨强度的增加先增加后减小,且坡度为 40°时不同降雨强度条件下的总侵蚀量差异明显。表明降雨强度对坡面侵蚀的影响受坡度的影响。在较小坡度条件下,随着降雨强度的增加,坡面径流量逐渐增大,汇流作用不断增强,从而使径流剥蚀土壤能力增强,导致侵蚀量增加。在较大坡度条件下,小雨强时,坡面主要侵蚀类型为雨滴击溅侵蚀,雨滴动能较小,击溅侵蚀较弱,而且下渗率较高,坡面径流小,侵蚀量较小;随着降雨强度增加,雨滴击溅侵蚀、面蚀、细沟侵蚀并存,表层松散的土体逐渐被破坏剥离,坡面汇流增强,侵蚀量增加;大雨强时,雨滴动能较大,但松散颗粒减少,更多砾石暴露,延长了径流路径,侵蚀量在一定程度上减小。

在相同降雨强度条件下,随着坡度的增大,土壤侵蚀量并未呈一直增加的趋势,而是在达到某一坡度值后不再增加,甚至有减小的趋势,即坡度对土壤侵蚀的影响存在临界坡度。本研究在坡度为 40°时的总侵蚀量较 30°时小,主要原因是坡度大,受雨面积减小,使坡面径流量减小,导致侵蚀量减小。说明坡度对胶东铁路弃土弃渣体的影响存在临近坡度,推断

临界坡度在 30°~40°。这与丁文斌等^[12]采用土工试验和野外实地放水冲刷试验确定的重庆市煤矿工程堆积体径流侵蚀临界坡度为 33°~35°的结论相符。

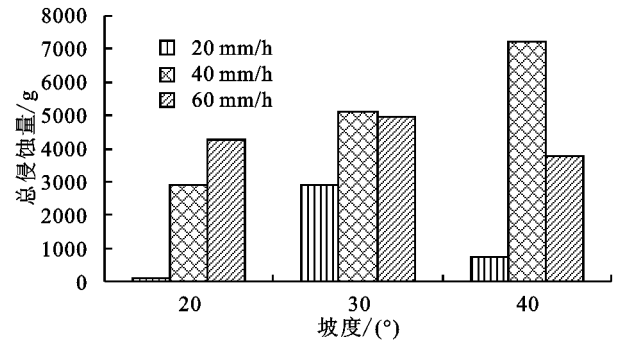


图 4 弃土弃渣体坡面总侵蚀量

以降雨强度 20 mm/h、弃土弃渣体坡度 20°时的侵蚀量为基准,将 40, 60 mm/h 雨强和 30°, 40°坡度的侵蚀量与其进行对比分析,探讨降雨强度、坡度两个因素对坡面侵蚀量的贡献率。由表 1 可知,当坡度为 30°时,雨强和坡度的综合作用导致侵蚀量明显增加,40, 60 mm/h 降雨强度条件下坡度的贡献率分别为 55.0%, 56.7%, 大于降雨强度的贡献率,但差异不明显;当坡度为 40°时,40, 60 mm/h 降雨强度条件下降雨强度的贡献率分别为 91.1%, 82.7%, 远远超过坡度的贡献率。这同样说明,在一定坡度范围内,坡度是影响坡面侵蚀的主要因素;随着坡度增加,超过临界坡度后,坡度对坡面侵蚀不再发挥主要作用,降雨强度成为影响坡面侵蚀的主要因素。

表 1 降雨强度、坡度对弃土弃渣体坡面侵蚀量贡献率

坡度/ (°)	侵蚀量/g			综合增量/g		坡度增量/g		雨强增量/g		坡度贡献率/%		雨强贡献率/%	
	20	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
	mm/h	mm/h	/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h
20	120.4	2886.7	4273.1	2766.3	4152.7	0	0	2766.3	4152.7	0	0	100.0	100.0
30	2872.9	5121.2	4975.6	5000.8	4855.2	2752.5	2752.5	2248.3	2102.7	55.0	56.7	45.0	43.3
40	750.4	7203.8	3756.9	7083.4	3636.5	630.0	630.0	6453.4	3006.5	8.9	17.3	91.1	82.7

注:坡度增量指相同降雨强度下,单由坡度增大引起侵蚀量的增加量;雨强增量指相同坡度下,单由雨强增大而引起侵蚀量的增加量。

3 结论

(1)随着降雨强度、坡度的增大,产流开始时间提前,其中坡度对坡面产流时间的影响大于降雨强度。

(2)随着降雨历时,径流量呈初期剧增到峰值,30 min 后逐渐趋于稳定的过程。相同坡度条件下,径流量在较小雨强(20, 40 mm/h)时随雨强的增大呈增加趋势;而在大雨强(60 mm/h)时径流量增加幅度较小,逐渐趋于稳定。相同雨强条件下,坡度对径流量的影响存在临界坡度,径流量随坡度的增大呈先增后减的趋势。

(3)产沙率在降雨历时初期剧增到峰值,5~20 min 后波动减小逐渐趋于稳定。相同坡度条件下,在 20, 40mm/h 雨强时产沙率随着降雨强度的增大呈增加趋势,但 60 mm/h 雨强导致产沙率略有下降。相同雨强条件下,坡度为 30°时坡度贡献率大于雨强贡献率,40°时雨

强贡献率超过坡度,坡度对产沙率的影响存在临界坡度(30°~40°),产沙率随坡度的增大先增后减。

参考文献:

- [1] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
- [2] 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.
- [3] 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[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [4] 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[J].水科学进展,2016,27(2):256-265.
- [5] 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[J].土壤学报,2017,54

- (6):1357-1368.
- [6] Dong J Z, Zhang K L, Guo Z L. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17: 8-14.
- [7] 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[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1044-1057.
- [8] 李宏伟,王文龙,黄鹏飞,等. 土石混合堆积体土质可蚀性 K 因子研究[J]. *泥沙研究*, 2014(2): 49-54.
- [9] 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.
- [10] 史倩华,李垚林,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.
- [11] Peng X D, Shi D M, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2014, 123: 215-224.
- [12] 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[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 153-161.
- [13] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等. 2 种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3): 558-569.
- [14] 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[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(4): 59-64.
- [15] 山东省水利厅(鲁水保字[2016]1号). 山东省水利厅关于发布省级水土流失重点预防区和重点治理区的通告[Z]. 2016-01-25.
- [16] 刘震. 水土保持监测技术[M]. 北京:中国大地出版社, 2004.
- [17] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(3): 78-83.
- [18] 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.
- [19] 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): 36-43.
- [20] 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.
- [21] 符素华,路炳军,叶芝菡. 地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 15-18, 34.
- [22] Wilcox B P, Wood M K, Tromble J M. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes [J]. *Journal of Range Management*, 1988, 41: 197-206.
- (上接第 79 页)
- [24] She D L, Liu D D, Xia Y Q, et al. Modeling effects of land use and vegetation density on soil water dynamics: Implications on water resource management [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28: 2063-2076.
- [25] 樊军,邵明安,王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. *草地学报*, 2006, 14(3): 261-264.
- [26] Shaltout K H, Sheded M G, El-Kady H F, et al. Phytosociology and size structure of *Nitraria retusa* along the Egyptian Red Sea coast [J]. *Journal of Arid Environment*, 2003, 53: 331-345.
- [27] 高永,党晓宏,虞毅,等. 乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿 (*Artemisia sphaerocphala*) 灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 1-7.
- [28] Mc Claran M P, Moore-Kucera J, Martens D A, et al. Soil carbon and nitrogen in relation to shrub size and death in a semi-arid grassland [J]. *Geoderma*, 2008, 145(1/2): 60-68.
- [29] Du H D, Jiao J Y, Jia Y F, et al. Phytogenic mounds of four typical shoot architecture species at different slope gradients on the Loess Plateau of China [J]. *Geomorphology*, 2013, 193: 57-64.
- [30] 樊瑞霞,李学斌,陈林,等. 荒漠草原油蒿 (*Artemisia ordosica*) 种群的空间分布格局特征[J]. *北方园艺*, 2016(1): 45-50.
- [31] 韩磊,张媛媛,解李娜,等. 狭叶锦鸡儿和小叶锦鸡儿灌丛沙堆的形态和发育及灌丛固沙能力的比较研究[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(3): 65-70.
- [32] 杜建会,严平,董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. *地理学报*, 2010, 65(3): 339-350.
- [33] 郝红敏. 水蚀风蚀交错带灌丛斑块结构及动态特征研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [34] 陈东,张宇清,吴斌,等. 毛乌素沙地南缘油蒿 (*Artemisia ordosica*) 灌丛沙堆形态特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(3): 565-572.
- [35] 刘金伟,李志忠,武胜利,等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(4): 628-635.
- [36] 许文强,罗格平,陈曦. 干旱区绿洲—荒漠过渡带灌丛土壤属性研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 583-586.
- [37] Ravi S, Breshears D D, Huxman T E, et al. Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics [J]. *Geomorphology*, 2010, 116(3/4): 236-245.
- [38] Ravi S, D'Odorico P, Okin G S. Hydrologic and aeolian controls on vegetation patterns in arid landscapes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): 1061-1064.