

模拟降雨条件下不同土石比例弃土堆置体产流产沙研究

陈磊^{1,2}, 谢永生^{1,2}, 田飞², 景民晓²

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究不同土石比例条件下弃土堆置体水土流失特征之间的差异,以前期概化的 4 类弃土堆置体中坡顶平台有车辆碾压的弃土堆置类型为研究对象,采用人工模拟降雨试验,研究 4 种土石比例弃土堆置体在 4 种降雨强度条件下的产流产沙特征。研究表明:4 种土石比例的弃土堆置体的开始产流时间随着砾石含量的增加而缩短;相同土石比例条件下,径流率和侵蚀速率随着降雨强度的增大而增大;相同降雨强度条件下,径流率和侵蚀速率随着土石比例的减小而减小;径流率随着降雨时间的推移在一定范围内呈波动式变化,侵蚀速率随时间推移呈稳定、波动两种变化趋势。不同土石比例弃土堆置体平均径流率、平均侵蚀速率随着砾石含量的增大而增大;总产沙量随着总径流量的增大而增大。

关键词:模拟降雨;弃土堆置体;径流;侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)03-0006-05

Study on Runoff and Sediment Yield of Spoil-banks with Different Ratios of Soil to Rock under Simulated Rainfall Condition

CHEN Lei¹, XIE Yong-sheng^{1,2}, TIAN Fei², JING Min-xiao²

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of*

Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to examine the differences of soil erosion characteristic of spoil-banks under different ratios of soil to rock, one of the four different types of spoilbanks was selected as research object based on previous research generalization, rolling compaction by construction machinery at the top of slope. The runoff and sediment characteristics of different ratios of soil to rock under four different rainfall intensities were studied by indoor artificial rainfall simulation experiments. The results showed that the initiative time of runoff of all spoilbanks decreased with the gravel content increasing; in the same ratio of soil to rock, runoff rate and erosion rate increased with the increase of rainfall intensities; in the same rainfall intensity, the runoff rate and erosion rate decreased with the decrease of ratio of soil to rock. The variation of runoff rate in a fluctuating tendency with the rainfall duration, while the erosion rate appeared in two types with the rainfall duration, which were stability and fluctuation. The mean runoff rate, mean erosion rate of different ratios of soil to rock of spoilbanks increased with the increase of gravel content; the total sediment increased with the increase of total runoff.

Key words: simulated rainfall; spoil-bank; runoff; erosion

在我国生产建设过程中,各类开发建设项目与日俱增,如水利工程建设、矿产资源开发、城镇开发区建设、铁路公路建设等。这些工程一般由于规模大、数量多,不仅对原生下垫面土壤造成破坏、扰动,而且在

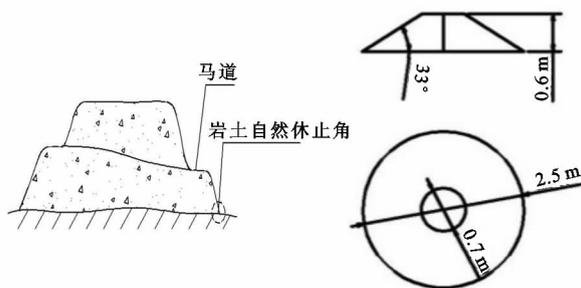
工程的建设过程中由于受挖填方的施工时段、材料质量、标段划分、运距等诸多因素的影响,不可避免地产生大量的弃土弃渣^[1-3],这些弃土弃渣物质成分以土、土夹砾石或块石为主,物质结构杂乱无章、分选性差、

透水性强。大量弃土弃渣的存在将会成为水土流失的重要来源^[4],该类型的水土流失具有点强面广的特点^[5]。许多国内外学者对开发建设项目水土流失做了很多研究,取得了许多成果^[6-11],但是目前这些研究往往是用填装土槽的方法进行的,未能准确反映弃土堆置体野外的堆积状况,将堆置形态作为影响水土流失特征的因素也鲜有人考虑。同时有许多研究表明^[12-15]:当砾石混入土壤后,产沙、入渗等一系列性质会发生改变。鉴于以上情况,笔者以赵暄等^[11]抽象概化出的4类弃土堆置体中的坡顶平台有车辆碾压的堆置类型作为研究对象,采用室内人工模拟降雨的方法对4种土石比例弃土堆置体进行人工模拟降雨试验,研究不同土石比例弃土堆置体的侵蚀产沙过程特征,以期为开发建设项目弃土堆置体水土流失量测算提供科学依据。

1 试验方法与设计

1.1 下垫面选择

根据赵暄等^[11]对开发建设项目弃土堆置体的分类概化,选择坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置类型(图1)作为模拟研究对象,研究该类型下不同砾石含量对弃土堆置体产流产沙特征的影响。在模拟弃土堆置体时,严格控制弃土堆置体的尺寸大小、容重和含水量等参数,确保下垫面状况一致^[12],从而保证试验结果的可靠性。堆置体坡度控制在 $(33\pm 2)^\circ$,坡面容重控制在 $1.10\sim 1.20\text{ g/cm}^3$,平台顶部容重控制在 $1.45\sim 1.55\text{ g/cm}^3$ 。



野外调查形态

室内模拟标准化参数

图1 坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置类型

1.2 试验设计

1.2.1 试验材料与仪器设备 试验土壤为陕西省杨凌地区重壤质土壤,土壤机械组成如下:土壤粒径为 $<0.001, 0.001\sim 0.01, 0.01\sim 0.05, >0.05\text{ mm}$ 的质量百分含量依次为14.50%,19.70%,60.25%,5.55%,堆土前将土壤过10 mm筛。所选用砾石为人工破碎石,大小为0~5 cm,根据碎石粒径大小,按一定质量百分数混合。其中碎石粒径为 $<1.5, 1.5\sim$

$3, 3\sim 5\text{ cm}$ 的质量百分含量依次为30%,50%,20%。将土壤与砾石按10:0.9:1.8:2.7:3(质量比)的比例均匀混合。实验前期的土壤含水量为12%~15%。

室内模拟降雨试验于2013年7—8月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅内进行,所用的降雨设备为下喷式自动模拟降雨器,喷头高18 m,满足所有降雨雨滴达到终点速度,降雨均匀度大于80%。试验采用去除重金属离子的纯净水作为模拟降雨水源,国际上采用纯净水作为水源来进行室内模拟降雨试验的方法已经被广泛应用^[16]。弃土堆置体侵蚀观测平台参见赵暄^[12]文中所述,平台的有效堆土面积为 $2.5\text{ m}\times 3.0\text{ m}$,坡度可调节范围为 $0\sim 10^\circ$,上层堆土平台坡度为 0° ,保持水平,下层水沙汇集平台以 5° 向集流装置倾斜,以保证堆土平台上的径流产沙全部汇入出水口处的径流桶内。上层堆土平台与下层水沙汇集平台用钢龙骨固定,保证上方堆土平台的稳定性。钢龙骨沿倾斜方向平行设置,不阻碍水沙的正常迁移。

1.2.2 雨强设计 试验选择1.0,1.5,2.0,2.5 mm/min共4组雨强。试验开始前在堆置体观测平台周围均匀布置6个雨量筒对雨强进行率定,待雨强达到试验要求后,开始试验,并记录产流时间,降雨时间为自产流起历时45 min。

1.2.3 取样和观测 每场试验开始前,测定弃土堆置体的表层容重及含水量。在人工模拟降雨试验开始产流时,记录产流产沙时间并取样。取样时间为:产流的前3 min,每1 min取一次径流泥沙样,之后每3 min取一个样。降雨结束后,用量筒测量取样体积,将采集的泥沙样烘干、称重。计算不同时间段的产沙量及总的产沙量。同时对应上述采样时间,测量不同时间段的产流量,并计算总的产流量。

1.3 数据分析

用Excel 2003和Sigma Plot 10.0对数据进行统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 堆置体形态特征及入渗特性分析

坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置类型在大型点式工程的施工过程中比较常见,如水利水电工程、矿产资源开发等。该类型的生产建设项目由于工程规模大、工期长、施工地点集中,在局部产沙的弃土弃渣量较大,弃土弃渣的堆积过程中堆置体坡顶经过车辆碾压夯实且使用施工机械的装载压实。堆置体经强力压实后土壤密度增大、渗透性降低,是导致径流和

产生侵蚀的主要原因。图 2 为不同雨强条件下,平均径流速率随砾石含量的变化关系,可以看出,相同降雨条件下,平均入渗速率随着砾石含量的增大而增大,当雨强 ≤ 1.5 mm/min 时,增大的趋势很明显,当雨强 ≥ 2.0 mm/min 时,增大的趋势不明显,基本持平。这与杨艳芬等^[17]的研究结果基本一致。主要原因是:由于土壤中碎石的存在一方面减小了过水断面,直接减小土壤的累积入渗量;另一方面增加了土壤中的大孔隙,大孔隙增加到一定数量后,在土壤中产生优势流,对土壤的入渗产生促进作用。碎石含量较小时,大孔隙的数量还不足以产生优势流,或产生优势流较少,使其促进作用小于过水断面阻碍作用,因此,随着砾石含量的增加,大孔隙数量的增加所产生的促进作用大于过水断面减小所产生的阻碍作用,平均入渗速率随含石量的增加而增加,随着砾石含量的继续增加,大孔隙的数量继续增加所产生的促进作用渐渐小于过水断面减小产生的阻碍作用,平均入渗速率随含砾石含量的增加而基本持平。

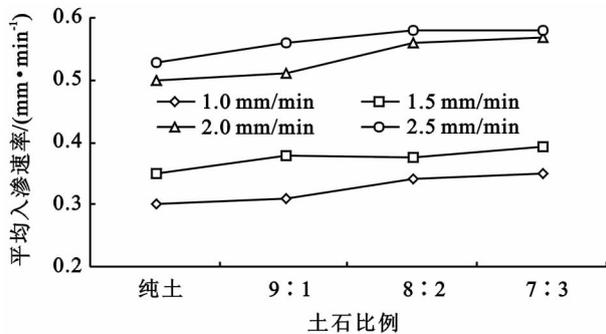


图 2 不同降雨强度下平均入渗速率随砾石含量的变化关系

2.2 不同土石比例堆置体开始产流时间分析

产流时间是坡面综合效应的反映,主要取决于降雨强度、坡度和土壤初始含水量。在降雨的最初阶段,降雨全部渗入土壤,坡面无径流产生。当雨强大于土壤入渗能力时,产生超渗雨。超渗雨形成坡面积水,然后沿坡面向低处流动,称为坡面漫流^[11]。影响产流时间的因素有土壤特性、降雨强度、坡度坡长及砾石含量等。图 3 为模拟降雨条件下坡面开始产流时间随砾石含量的变化关系。从总体上看,开始产流时间随着砾石含量的增大而缩短。原因在于在降雨的最初阶段,主要是雨滴浸润土壤和砾石的过程。由于砾石的存在,一部分雨滴击溅砾石,使砾石表面湿润。随着时间的推移,砾石包裹一层水膜使土壤与砾石的周边接触成为入渗点,进而逐渐增大了水分湿润土壤的面积,入渗随之增加。当砾石被完全浸润后,入渗不再以入渗点的形式进行。这实际上是由于砾石的存在增大入渗孔隙的弯曲度,从而延缓了入渗,增加了坡面汇流,使产流时间减小。而且当土壤中砾

石含量越大,坡面暴露的砾石也就越多,砾石的这种作用也就越明显。

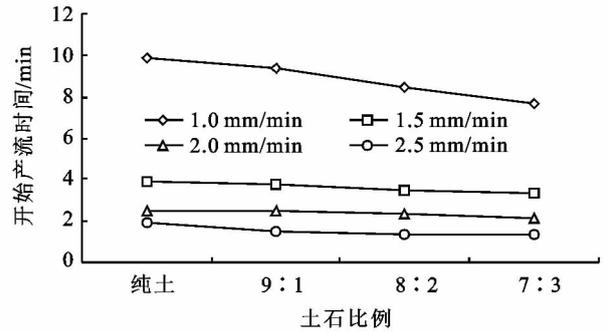


图 3 不同降雨强度下产流时间随砾石含量的变化关系

2.3 不同土石比例弃土堆置体径流率分析

径流是坡面侵蚀产生的主要营动力又是土壤输沙的载体;径流率是指单位时间的径流量,主要受下垫面状况和降雨强度的影响。图 4 为不同土石比例弃土堆置体径流率随降雨时间的变化关系。图 4 表明:同一土石比条件下,径流速率随着降雨强度的增大而增大;相同降雨强度下,径流率随着土石比例的减小而减小。在不同的降雨强度条件下,不同土石比例堆置体的径流率在产流后 5~8 min 内,径流率缓慢增大,之后随着时间的推移在一定范围内上下波动。主要是因为降雨开始后,雨水滴到坡面初期,水分全部渗入土壤,坡面不产流;随着时间的推移,表层土壤入渗效率明显降低,当降雨强度大于坡面表层土壤入渗速率时,形成超渗径流,径流率逐渐增大;坡面产流 5~8 min 后,表层土壤水分达到饱和,径流率基本稳定,并在一定范围内呈上下波动。径流率随砾石含量的增加而减小,主要因为砾石含量增加,其入渗速率增大,累计入渗量也增大,所以径流率减小。

2.4 不同土石比例弃土堆置体侵蚀速率分析

研究侵蚀输沙能力大小的有许多表征方式,其中侵蚀速率能够较为直观地体现降雨过程中各时段侵蚀的剧烈程度。侵蚀速率是指单位时间内产生的泥沙量,主要受降雨强度、土石比例等影响。图 5 为不同土石比例弃土堆置体侵蚀速率随降雨时间的变化关系。图 5 表明:同一土石比例条件下,侵蚀速率随着降雨强度的增大而增大;相同降雨强度条件下,侵蚀速率随着土石比例的减小而减小。侵蚀速率随砾石含量的增大会减小主要是因为砾石含量的增多,导致土石混合体的抗侵蚀能力增大。总体上看,不同土石比例弃土堆置体侵蚀速率随着降雨时间的持续而表现出两种变化趋势:在 1.0, 1.5 mm/min 降雨强度下,侵蚀速率随降雨时间呈平缓的变化趋势;在 2.0, 2.5 mm/min 降雨强度下侵蚀速率随降雨时间在一定范围内呈波动变化。因为雨强较小时,坡面径流量

小,挟带泥沙的能力弱,小于土石混合体的抗侵蚀能力,因而侵蚀速率小,此时,降雨强度和入渗速率基本达到动态平衡,坡面径流率相对稳定,所以侵蚀速率随降雨时间的变化不明显;当降雨强度较大时,坡面

径流量大,挟带泥沙的能力强,且大于土石混合体的抗蚀能力,因而侵蚀速率较大,随着砾石含量的增加,这种抗侵蚀能力进一步增大,所以,随着砾石含量的增加侵蚀速率减小。

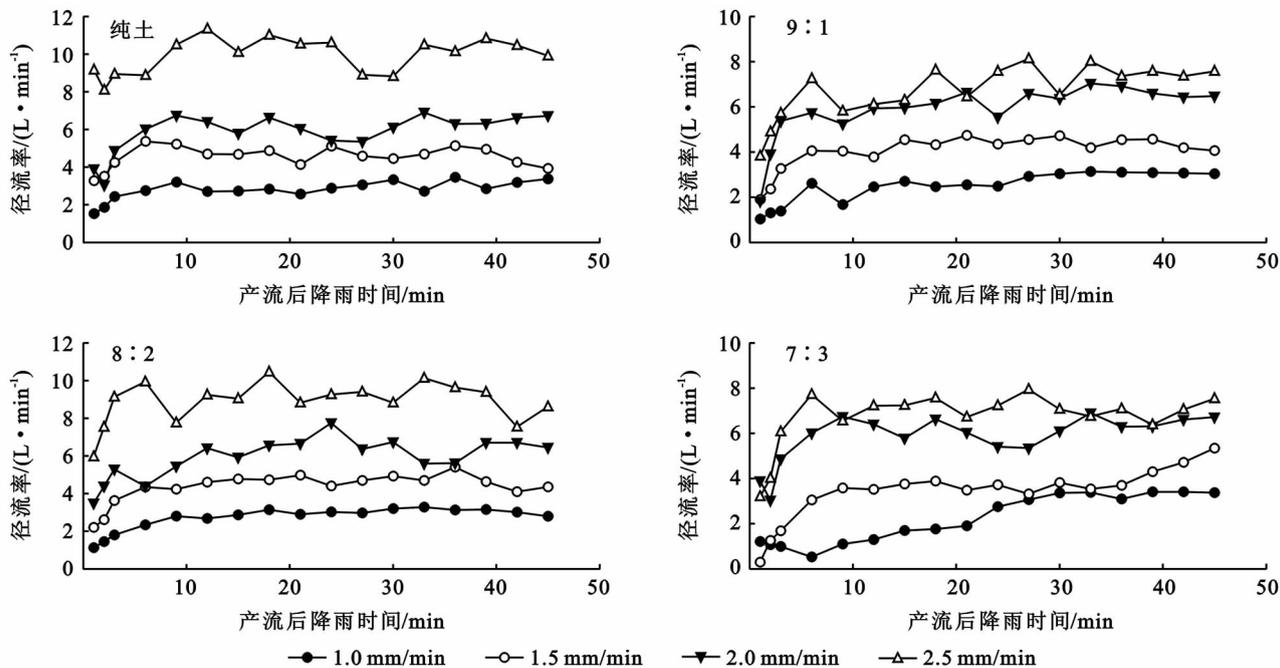


图4 不同降雨强度下径流率随降雨时间的变化关系

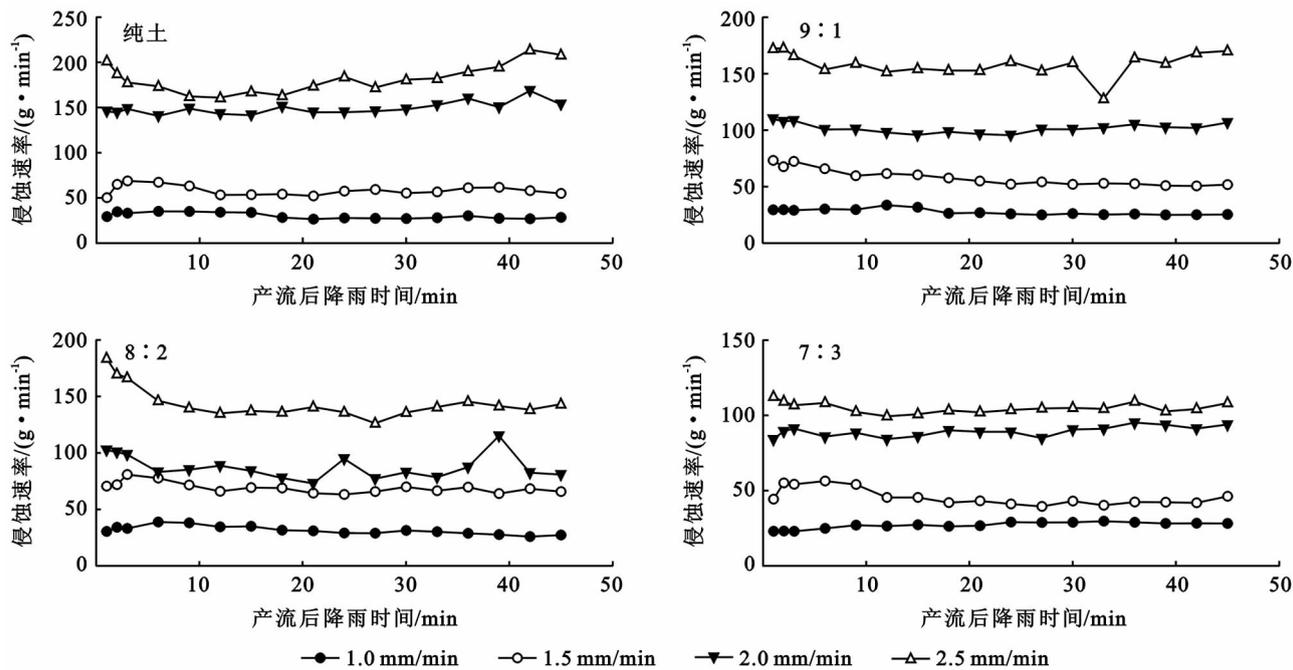


图5 不同降雨强度下侵蚀速率随降雨时间的变化关系

2.5 不同土石比例弃土堆置体径流产沙关系分析

产流量与产沙量之间的变化关系是描述一个特定下垫面水土流失的重要指标。图6为不同土石比例弃土堆置体总径流量和总产沙量随砾石含量的变化关系。不同土石比例弃土堆置体总径流量和总产沙量随砾石含量的增大而减小。在降雨强度 ≤ 1.5

mm/min时,不同土石比例弃土堆置体总径流量和总产沙量差异不大;在降雨强度 ≥ 2.0 mm/min时,不同土石比例弃土堆置体的总径流量和总产沙量呈现出一定的差异性,并且随着雨强的增大,这种差异性越显著。主要原因是当降雨强度 ≤ 1.5 mm/min时,由于堆置体平台顶部的容重较大,而雨滴的溅蚀和冲

刷能力相对较小,对不同土石比例堆置体的冲刷效果不是很明显,所以,总径流量和总产沙量之间的差异不大;当降雨强度 ≥ 2.0 mm/min时,雨滴的溅蚀和冲刷能力较大,坡面流在搬运泥沙的过程中,砾石对径流有一定的阻滞作用,砾石含量越多,雨滴搬运泥沙的能量就越小,不同土石比例的总径流和泥沙量的差异性就会越大。

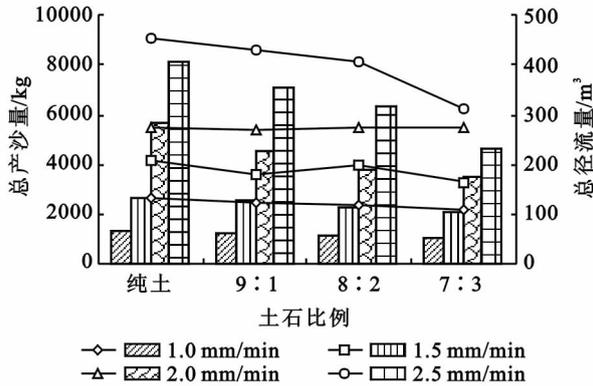


图6 总径流量和总产沙量随砾石含量的变化关系

注:柱形表示产沙量,线性表示产流量

3 结论

本研究在模拟降雨条件下,选择坡顶平台有车辆碾压的弃土堆置类型的4种不同土石比例弃土堆置体为研究对象,分析了在4种雨强条件下的产流产沙过程特征,结果表明:

(1) 弃土堆置体随着砾石含量的增加,大孔隙数量的增加所产生的促进作用大于过水断面减小所产生的阻碍作用,平均入渗速率随含石量的增加而增加,随着砾石含量的继续增加,大孔隙的数量继续增加所产生的促进作用渐渐小于过水断面减小产生的阻碍作用,平均入渗速率随砾石含量的增加而基本持平。

(2) 弃土堆置体的开始产流时间随砾石含量的增大而缩短;相同土石比例条件下,径流率随着降雨强度的增大而增大;相同降雨条件下,径流率随着土石比例的减小而减小;径流率随着降雨时间的推移在一定范围内呈波动式变化,侵蚀速率随时间推移呈稳定、波动两种变化趋势。

(3) 弃土堆置体的平均径流率、平均侵蚀速率随砾石含量的增大而增大;总产沙量随着总径流量的增大而增大。

参考文献:

- [1] Mitchell J K, Moldenhauer W C, Gustafson D. Erodibility of selected reclaimed surface mined soils[J]. Transaction of ASAE, 1983, 26(5): 1413-1421.
- [2] 李文银, 王治国, 蔡继清. 工矿区水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 景峰, 张学培, 郭汉清, 等. 山西省葛铺煤矿弃土弃渣径流泥沙研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 61-64, 73.
- [4] 柳小强. 工程弃土土壤侵蚀人工模拟降雨试验研究[J]. 亚热带水土保持, 2009, 21(2): 1-5.
- [5] 冀秉信, 王海卫, 高秀娟. 论开发建设项目与水土保持[J]. 山西科技, 2002(增刊): 55.
- [6] 罗婷, 王文龙, 李宏伟, 等. 开发建设中扰动地面新增水土流失研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 30-35.
- [7] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 68-71.
- [8] 陈奇伯, 黎建强, 王克勤, 等. 水电站弃渣场岩土侵蚀人工模拟降雨试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 1-4.
- [9] 倪含斌, 张丽萍. 神东矿区堆积弃土坡地入渗规律试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 28-31.
- [10] 倪含斌, 张丽萍, 张登荣. 模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2065-2071.
- [11] 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.
- [12] 赵暄, 谢永生, 王允怡, 等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 1-8.
- [13] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 782-785.
- [14] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 88-91.
- [15] 毛天旭, 朱元骏, 邵明安, 等. 模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1215-1217.
- [16] Igwe C A, Udegbonam O N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria[J]. International Agrophysics, 2008, 22(4): 319-325.
- [17] 杨艳芬, 王全九, 曾辰, 等. 土石混合介质水分入渗特性试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 87-90.