

扰动高沙土侵蚀规律的试验研究

张以森^{1,2}, 郭相平¹, 吴玉柏², 周华强²

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要: 为了指导施工过程中扰动高沙土堆放及其防护措施, 采用人工模拟降雨试验, 研究了工程扰动高沙土的水力侵蚀规律. 试验结果表明: 扰动高沙土坡面降雨初期径流泥沙浓度较高, 而后呈逐渐下降趋势; 侵蚀量与降雨量正相关, 低于 15° 时, 产生侵蚀的最小启动雨量约为 5 mm. 扰动高沙土在 $20.0^\circ \sim 26.5^\circ$ 之间存在临界坡度, 与降雨量相比, 坡度对侵蚀量的影响更为明显; 侵蚀量与径流量正相关, 单位径流的侵蚀量与坡度呈抛物线关系. 坡度超过 15° 时, 通过技术措施减少坡面径流量是控制坡面侵蚀的有效手段.

关键词: 模拟降雨; 扰动沙土; 土壤侵蚀; 规律

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2010)05-0522-05

我国正处在城市化、工业化和现代化进程中, 各类工矿企业和基础设施在施工建设和生产运行过程中产生了大量的扰动土和扰动坡面, 使得建设项目区域内水力侵蚀现象严重, 其产沙量增加至建设期之前的 30 ~ 80 倍^[1]. 建设项目引起的水土流失, 不仅破坏土地资源, 而且会危及施工现场及附近居民的安全. 工程扰动土堆积, 不仅占用土地、破坏植被, 降雨引起的水土流失还会污染水体, 影响环境, 甚至导致堆土滑塌, 堵塞道路和排水系统, 给人民生命和财产安全造成威胁. 与一般自然坡面的侵蚀不同, 扰动土的堆积坡度可由人为控制, 并受到土壤质地和施工机械爬坡能力的影响. 通过合理控制边坡, 可以改变扰动土的侵蚀强度, 并尽可能减少堆土的占地面积. 目前, 建设项目扰动土的研究主要集中在侵蚀模数的预测方面^[2-4], 对其结合施工机械爬坡能力和占地, 寻求适当堆土坡度以及侵蚀规律的研究较少. 笔者通过模拟试验, 对江苏省高沙土区扰动土堆积坡面的侵蚀规律进行了研究, 以期对于施工过程中堆土的防护有所帮助.

1 试验设计与试验过程

1.1 试验设计

试验于 2009 年 8—9 月在南京林业大学人工模拟降雨大厅进行, 降雨设备为下喷式人工降雨器, 降雨高度为 6 m, 有效降雨面积为 30 m^2 , 降雨均匀度在 85% 以上. 试验土槽为移动式变坡钢槽, 尺寸为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$, 纵向坡长为 3 m. 钢槽下有小孔, 用来模拟水分下渗. 坡度调节范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$. 根据堆土机械的攀爬能力和沙土内摩擦角, 本文试验设计 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 26.5^\circ$ ($1:2$ 坡度) 5 个坡度. 试验设计的降雨强度为 50 mm/h , 次降雨量分别为 5 mm, 15 mm, 25 mm, 45 mm, 65 mm, 共 25 个处理, 各处理重复 2 次, 共 50 次. 各处理取平均值进行计算和分析.

试验土壤为江苏通南地区高沙土, 取自如皋市搬经镇, 有机质质量分数为 0.56%, 土壤各粒级质量分数: 大于 0.05 mm 为 74.2%, 0.01 ~ 0.05 mm 为 5.42%, 0.001 ~ 0.01 mm 为 16.23%, 小于 0.001 mm 为 4.15%. 土壤自然风干后, 去除树叶、石块等杂物, 在钢槽底部铺纱布, 然后分层装土, 每层厚 5 cm, 按 1.35 g/cm^3 干密度逐层压实, 土壤层总厚度为 20 cm. 装满后将表土平整压实.

每次试验的前 1 天下午, 将钢槽坡度调整为 10° , 在 50 mm/h 的雨强下对坡面降雨, 坡面刚好产流时停止降雨, 以保证每次降雨的下垫面条件一致, 减少试验土槽的空间变异性.

试验前将钢槽用防水布覆盖防水,钢槽周围放上量雨筒.调节降雨强度直至设计雨强,稳定后打开防水布开始试验.

1.2 测试内容与方法

- a. 径流量 每个钢槽的出口处放置一个水桶,采用体积法测定.
- b. 泥沙浓度 开始产流后,每隔 2 min 在钢槽出口处接取 200 mL 水样,然后用烘干法测量泥沙浓度.
- c. 侵蚀量 降雨结束后,把桶中径流产物充分搅匀,迅速取出 1 L 水样,用烘干法测泥沙量,根据总径流量计算总侵蚀量.

2 结果与分析

2.1 坡度对泥沙质量浓度的影响

产流初期,泥沙浓度比较低,5 min 后,各坡度径流中泥沙质量浓度快速上升并达到最大值,然后随着时间延续而逐渐下降,下降趋势较为平缓,如图 1 所示.

产生上述现象的主要原因可能是:(a)降雨初期,土壤表面疏松,雨滴击溅侵蚀强烈,形成大量细小土壤颗粒,导致泥沙质量浓度迅速上升;(b)随着降雨延续,初期产生的细小颗粒填充了原有的土壤空隙,表土板结形成致密层,土壤颗粒作用力增大,抗蚀能力增加.土壤结构变得密实,导致泥沙质量浓度降低.土壤板结造成入渗率降低,坡面径流深度增加,削弱了雨滴击溅侵蚀能力,并可降低坡面水流的紊动程度,导致水流挟沙能力下降.

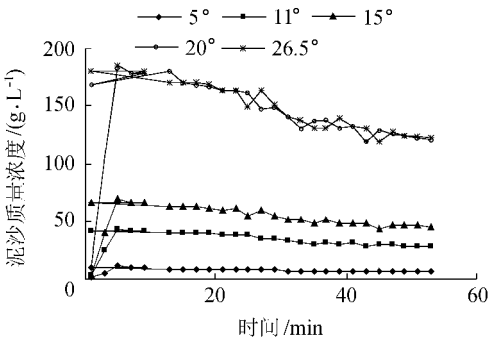


图 1 坡度对泥沙质量浓度的影响(降雨量 45 mm)
Fig. 1 Effect of slope angle on sediment concentration (rainfall amount of 45 mm)

从图 1 还可以看出,随着坡度的增加,坡面径流中泥沙质量浓度迅速提高,在接近 20°时达到极值.当坡度超过 20°时,泥沙质量浓度趋于稳定,表明试验所采用之扰动沙土的临界坡度为 20°~26.5°.

2.2 土壤侵蚀量与降雨量和坡度的关系

由图 2 看出,在不同坡度的情况下,径流量随着降雨量的增大而线性增加,达到极显著相关水平,且随着坡度增加,直线斜率(类似于径流系数)增加,见表 1.由图 3 可见,侵蚀量与降雨量之间的关系近乎直线,这与以往研究结论相一致^[5-8].坡度较小时(小于 15°),降雨初期单位降雨量的侵蚀量很小,存在产生侵蚀的最小启动雨量(约为 5 mm),而后增加速率较快,这与初期入渗速率大、产流少有关.坡度较大时,最小启动雨量变小,且初期侵蚀速率高于后期,这与早期径流中泥沙浓度较高相一致(见图 1).

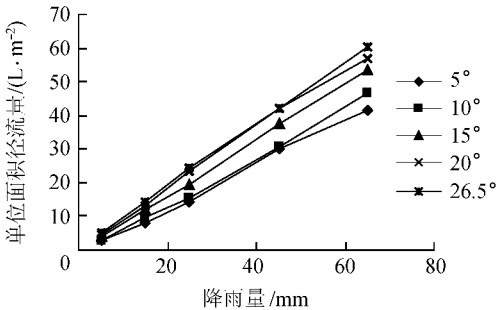


图 2 径流量与降雨量的变化

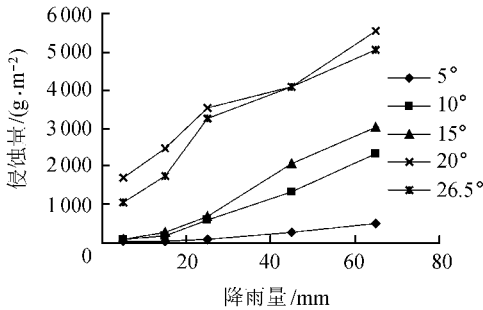


图 3 土壤侵蚀量与降雨量的变化

坡度小于 20°时,在雨量较小(小于 25 mm)的情况下,侵蚀量随坡度的增加而提高的速率不大,在高雨量(大于 25 mm)情况下,侵蚀量则随坡度增加而迅速升高,如图 4 所示.对于各种雨量,坡面在 15°~20°之间有剧烈跃升,并在 20°时达到极值.超过该坡度,侵蚀量开始下降,如图 3 所示.这表明,扰动高沙土的临界坡度在 20°~26.5°之间,这与陈发扬等^[9-12]的研究相一致.

随着坡度的增加,溅蚀侵蚀量增加,坡面流速加快,径流侵蚀能力增加,而且斜坡土体的重力分量增加,

表1 径流量、侵蚀量与降雨量的回归方程

Table 1 Regression equations for runoff amount, erosion amount and rainfall amount

坡度/(°)	径流量与降雨量		侵蚀量与降雨量	
	回归方程	相关系数 R ²	回归方程	相关系数 R ²
5	$y = 0.671x - 1.4264$	0.9952	$y = 8.4035x - 68.872$	0.9456
10	$y = 0.73x - 1.4867$	0.9972	$y = 38.635x - 295.45$	0.9755
15	$y = 0.8361x - 0.5935$	0.9993	$y = 52.252x - 385.66$	0.9831
20	$y = 0.8894x + 0.4503$	0.9973	$y = 60.871x + 1579.9$	0.9677
26.5	$y = 0.922x + 0.5926$	0.9997	$y = 66.332x + 973.76$	0.9467

土壤颗粒更易被径流冲走.上述因素使得侵蚀量随坡度增加有增大的趋势.另一方面,随着坡度的增大,承雨面变小,单位土面积径流量及冲刷量也相应变小,这两方面因素相互作用导致临界坡度出现.

对于扰动土而言,通过坡面控制土壤侵蚀强度的作用是明显的.可以看出,坡度为20°时,5 mm降雨量产生的侵蚀量远大于15°,25 mm时的侵蚀量,25 mm降雨量产生的侵蚀量大于15°,65 mm时的侵蚀量.超过20°,侵蚀量随坡度增加有降低的趋势,但对于绝大部分行走式推土、装卸设备而言,施工机械无法安全上行.而且,由于高沙土的内摩擦角小、坡度过大,容易引起重力侵蚀(坍塌、滑坡等),危及施工和周围地区安全.因此,高沙土扰动坡面的堆放坡度应尽量控制在20°以内.

相同雨强(mm/h)下,对5°~20°坡面侵蚀量和坡度关系进行回归分析,结果如表2所示,表中, y 为侵蚀量, g/m^2 ; x 为坡度; $F_{0.01} = 34.12$, $F_{0.05} = 10.13$.由表2和表3可以看出,随着降雨量增加,侵蚀量与坡度之间的相关性(F 值)增加,在20°时达到极值,然后开始降低.在降雨量为5 mm时,侵蚀量与坡度的回归方程不显著.降雨量较大时(15~25 mm)达到显著水平.在45 mm和65 mm降雨量时,达到了极显著水平.产生上述现象的原因是降雨量较小时,径流量和侵蚀量也较小,放大了外部因素对土壤侵蚀的影响,而当降雨量较大时,外部因素对土壤侵蚀的影响相对较小.

表2 侵蚀量与坡度的回归方程

Table 2 Regression equations for erosion amount and slope angle

降雨量/ mm	乘幂回归方程					指数回归方程				
	乘幂	R^2	F 值	F 检验	显著性	指数	R^2	F 值	F 检验	显著性
5	$y = 0.2895x^{2.534}$	0.7056	4.793	$F < F_{0.05}$	不显著	$y = 5.3847e^{0.2535x}$	0.8140	8.755	$F < F_{0.05}$	不显著
15	$y = 0.67x^{2.5073}$	0.8546	11.755	$F > F_{0.05}$	显著	$y = 13.06e^{0.2446x}$	0.9376	30.047	$F > F_{0.05}$	显著
25	$y = 2.3122x^{2.3276}$	0.9216	23.498	$F > F_{0.05}$	显著	$y = 41.108e^{0.2174x}$	0.9268	25.331	$F > F_{0.05}$	显著
45	$y = 12.246x^{1.9407}$	0.9842	124.932	$F > F_{0.01}$	极显著	$y = 146.03e^{0.1749x}$	0.9221	23.663	$F > F_{0.05}$	显著
65	$y = 41.787x^{1.6364}$	0.9670	58.615	$F > F_{0.01}$	极显著	$y = 342.55e^{0.1464x}$	0.8923	16.565	$F > F_{0.05}$	显著

2.3 侵蚀量与径流量的关系

降雨量越大,径流量也越大,土壤的侵蚀量也就越大.经回归分析表明,侵蚀量和径流量呈线性相关,侵蚀量与径流量在0.01水平上显著,达到极显著水平,如表3所示.表中, y 为侵蚀量, g/m^2 ; x 为径流量, L/m^2 ; $F_{0.01} = 21.20$, $F_{0.05} = 7.71$.表3表明,控制径流量,采用铺盖防水、设置排水沟等方法,是减少扰动土坡面土壤侵蚀量的有效手段.

表3 侵蚀量和径流量的回归方程

Table 3 Regression equations for erosion amount and runoff amount

坡度/(°)	回归方程	R^2	自由度	F 值	F 检验	显著性
5	$y = 12.464x - 49.837$	0.9410	(1,4)	47.869	$F > F_{0.01}$	极显著
10	$y = 53.145x - 221.49$	0.9865	(1,4)	219.659	$F > F_{0.01}$	极显著
15	$y = 62.622x - 351.79$	0.9878	(1,4)	242.264	$F > F_{0.01}$	极显著
20	$y = 68.166x + 1556.7$	0.9626	(1,4)	77.122	$F > F_{0.01}$	极显著
26.5	$y = 72.225x + 922.95$	0.9544	(1,4)	62.799	$F > F_{0.01}$	极显著

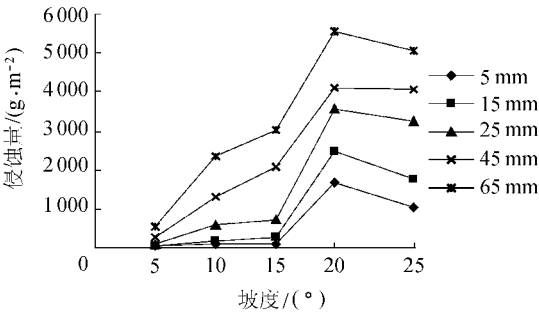


图4 土壤侵蚀量随坡度的变化(雨强 mm/h)

Fig. 4 Relationship between erosion amount and slope angle (rainfall intensity : mm/h)

进一步分析还可以发现,随着坡度增加,单位径流量的侵蚀量(相当于流出坡面时的挟沙能力)增加,然后降低,呈现出明显的抛物线关系,如图 5 所示.

3 结 论

- a. 扰动高沙土坡面降雨初期径流泥沙质量浓度较高,而后呈逐渐下降趋势.
- b. 侵蚀量与降雨量正相关. 低于 15°时,存在产生侵蚀最小启动雨量,约为 5 mm.
- c. 扰动高沙土在 20°~26.5°之间存在临界坡度. 与降雨量相比,坡度对侵蚀量的影响更为明显. 考虑到施工机械爬坡能力和高沙土的内摩擦角较小,将扰动堆土坡面控制在 20°以内对降低侵蚀较为有利.
- d. 侵蚀量与径流量正相关. 单位径流的侵蚀量与坡度呈抛物线关系. 坡面超过 15°时,通过技术措施减少坡面径流量是控制坡面侵蚀的有效手段.
- e. 上述结论仅为室内模拟试验所得,其正确性有待进一步证实.

对土壤侵蚀较为严重的降雨类型为暴雨,本文试验所用的降雨强度达到了暴雨级别,因此试验结论适合于强降雨下的降雨侵蚀,中小雨强下的侵蚀规律还需要进一步研究. 本文试验中的侵蚀为坡面侵蚀,没有发生沟蚀现象.

参考文献:

[1] 孙飞云,杨成永,杨亚静. 开发建设项目水土流失生态影响分析[J]. 人民长江,2005(10) :61-63. (SUN Fei-yun, YANG Cheng-yong, YANG Ya-jing. Analysis ecological impact of soil and water loss in development and construction projects[J]. Yangtze River,2005 (10) :61-63. (in Chinese))

[2] 王治国,段喜明. 开发建设项目水土流失预测的若干问题讨论[J]. 中国水土保持,2000(4) :35-37. (WANG Zhi-guo, DUAN Xi-ming. Problem discussion about soil loss prediction in development and construction projects[J]. Soil and Water Conservation in China,2000(4) :35-37. (in Chinese))

[3] 李智广,曾大林. 开发建设项目土壤流失量预测方法初探[J]. 中国水土保持,2001(4) :24-26. (LI Zhi-guang, ZENG Da-lin. Preliminary study of prediction of soil erosion amount in development and construction projects[J]. Soil and Water Conservation in China, 2001(4) :24-26. (in Chinese))

[4] 高旭彪. 开发建设项目土壤侵蚀模数预测方法初步研究[J]. 中国水土保持科学,2008,6(3) :116-120. (GAO Xu-biao. Prediction method for erosion rates on developing and construction projects[J]. Science of Soil and Water Conservation,2008,6(3) :116-120. (in Chinese))

[5] 孟君,王慧觉,卫苗苗. 公路建设项目中降雨因子对土壤流失量的影响分析[J]. 交通科技,2007(5) :81-83. (MENG Jun, WANG Hui-jue, WEI Miao-miao. Analysis of influence of rainfall factors on the amount of soil erosion in highway construction[J]. Project Transportation Science & Technology,2007(5) :81-83. (in Chinese))

[6] 吕甚悟,李君莲. 降雨及土壤湿度对水土流失的影响[J]. 土壤学报,1992,29(1) :94-102. (LU Shen-wu, LI Jun-lian. Influence of rainfall and soil wetness on water and soil losses[J]. Acta Pedologica Sinica,1992,29(1) :94-102. (in Chinese))

[7] 万廷朝. 黄丘五副区降雨和地形因素与坡面水土流失关系研究[J]. 中国水土保持,1996(12) :26-28. (WAN Ting-chao. Study on relation between rainfall, landform and soil loss from slope surface in No. 5 sub region of the rolling loess region[J]. Soil and Water Conservation in China,1996(12) :26-28. (in Chinese))

[8] 陈婷,杨泽贵,杜伟明. 不同土地利用方式的水土流失特征研究[J]. 陕西农业科学,2009(3) :99-101. (CHEN Ting, YANG Ze-gui, DU Wei-ming. The study of soil erosion characteristic in different use patterns of land[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2009(3) :99-101. (in Chinese))

[9] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. 中国水土保持,1985(2) :18-19. (CHEN Fa-yang. Influence test of soil erosion amount in different slope[J]. Soil and Water Conservation in China,1985(2) :18-19. (in Chinese))

[10] 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. (WANG Xiu-ying, CAO Wen-hong, CHEN Dong. Study on relationship between soil erosion and land slope[J]. Journal of Sediment Research,1998(2) :36-41. (in Chinese))

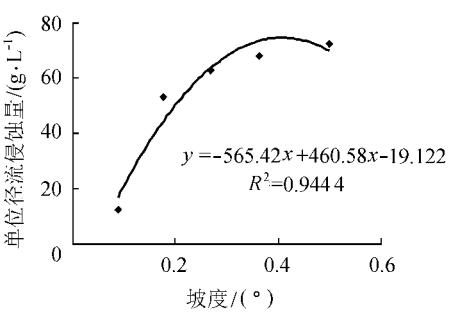


图 5 坡度与单位径流侵蚀量关系

Fig. 5 Relationship between slope angle and soil erosion by runoff per unit

[11] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理研究, 1995, 50(3): 234-239. (JIN Chang-xing. A theoretical study on critical erosion slope gradient[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(3): 234-239. (in Chinese))

[12] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 876-880. (XIA Wei-sheng, LEI Ting-wu, ZHANG Qing-wen, et al. Relationship between velocity of slope flow and sediment generation during erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 876-880. (in Chinese))

Experimental study on erosion rules of disturbed sandy soil

ZHANG Yi-sen^{1, 2}, GUO Xiang-ping¹, WU Yu-bai², ZHOU Hua-qiang²

- (1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Jiangsu Water Conservancy Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract : In order to guide the stacking of disturbed sandy soil and to provide relevant measures during the construction process, the artificially simulated rainfall experiments were conducted to study the hydraulic erosion rules of disturbed sandy soil. The results show that the sediment concentration in the runoff on the slope surface of disturbed sandy soil is high at the initial stage of rainfall and then gradually decreases. The erosion amount is in a positive correlation with the rainfall amount. When the slope angle is lower than 15°, the smallest rainfall amount which leads to soil erosion is about 5 mm. The disturbed sandy soil has a critical slope angle between 20° and 26.5°. Compared with the rainfall amount, the slope angle has more obvious effect on the erosion amount. The erosion amount is in a positive correlation with the runoff amount, and there is a parabola relationship between the slope angle and the soil erosion induced by the runoff per unit. When the slope angle is larger than 15°, reducing the runoff amount by means of technical measures is an effective way to control the surface erosion.

Key words : simulated rainfall ; disturbed sandy soil ; soil erosion ; rule