

选沙对水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响*

李书钦^{1,2}, 高建恩^{1,2,3}, 邵辉³, 赵春红³, 杨世伟^{1,3}, 梁改革^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对坡面水力侵蚀比尺模拟试验存在的选沙困难、侵蚀过程相似验证不充分的问题, 在前人研究的基础上, 就降雨条件下选沙对黄土坡面水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响进行了研究。结果表明, 无论选用何种模型沙, 当雨强比尺满足 $i = 1/2$, 土壤含水量比尺满足 $w = 1$, 径流过程都满足相似; 依据悬浮相似选择的模型沙, 需检验其是否满足起动相似, 利用经检验不满足起动相似的模型沙进行的试验, 侵蚀过程也不满足相似; 利用依据起动相似选择的模型沙进行的试验, 侵蚀过程满足相似要求。黄土坡面水力侵蚀比尺模拟试验宜选用依据起动相似为主的选沙方法选择模型沙。

关键词: 水力侵蚀; 相似比尺; 模拟试验; 选沙

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2009)03-0006-05

Effects of Model Material Selection on the Similarity of Erosion Processes in Hydraulic Erosion Simulation Experiment

LI Shu-qin^{1,2}, GAO Jian-en^{1,2,3}, SHAO Hui³, ZHAO Chun-hong³, YANG Shi-wei^{1,3}, LIANG Gai-ge^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, National Engineering Center of Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to solve the problems on the difficulties in model material selection, based on the previous results, the authors made a study on the effects of model material selection on the similarity of erosion processes in hydraulic erosion simulation experiment. The results showed that: the runoff processes basically met the requirement of similarity as long as the boundary conditions, including that rainfall intensity met $i = 1/2$, and soil water content met $w = 1$ etc., were similar; Model material which been selected based on the suspension similitude rule should be verified whether it could meet the requirement of incipient motion similarity, model material which been verified couldn't meet the requirement of incipient motion similarity didn't meet the similarity of erosion processes; Model material which been selected based on the incipient motion similarity rule basically met the requirement of erosion processes similarity. It would be better to select model material based on the incipient motion similarity rule in water erosion simulation experiment on loess slope.

Key words: hydraulic erosion; similarity scale; simulation experiment; model material selection

水力侵蚀比尺模拟试验是研究小流域水土流失规律、水土保持措施优化及效益分析的有效方法,也是模型黄河的重要内容。在水力侵蚀比尺模拟试验中,为了满足侵蚀产沙相似,首先应解决模型沙的选择问题。而国内外学者在使模型满足几何相似、重力相似和适当考虑泥沙运动相似后,通过大量的相似模拟试验,在径流理论^[1-4]、水土保持治理措施优化配置与产流产沙关系方面取得一些成果^[5-9],但总体上还未能很好地解决模型的相似准则及与之相关的模型设计问题,特别是模拟试验首先应解决的选沙问题方面,由于选沙理论和实践经验的欠缺,水力侵蚀比尺模拟试验仍选用和原型沙相同或基本相近的模型沙进行试验,实践证明这种选沙方法存在很大的缺陷,无法满足侵蚀过程相似^[10-11],模型试验的结果也无法定量转换到原型。而在河工模型试验领域,模型的相似理论和模拟技术都已相当成熟,选沙的理论也较完善,这为坡面水力侵蚀比尺模拟试验设计及选沙方法的研究提供了一定理论基础和解决问题的思路。但水力侵蚀比尺模拟试验和河工模型试验有很大不同,河工模型试验选沙方法在水力侵蚀比尺模拟试验中是否适用还有待进一步研究。针对水力侵蚀比尺模拟

* 收稿日期: 2009-02-28

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD09B01, 2006BAD01B04); 国家自然科学基金项目(50809056, 40701092)

作者简介: 李书钦(1985-), 男, 河南郑州人, 硕士生, 从事水土保持与水土资源高效利用研究。E-mail: lishuqin03@163.com

通讯作者: 高建恩(1962-), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事地表径流调控与利用研究。

试验存在的问题,本文在室内设计了几何比尺为 2.5 的系列裸地坡面模拟试验,通过在模型上选用依据不同选沙方法选择的模型沙,研究降雨条件下选沙对黄土坡面水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响,以期为水力侵蚀比尺模拟试验提供一定的参考。

1 试验设计

本文采用室内大型土槽降雨侵蚀试验的观测资料作为原型资料,和原型几何相似土槽降雨侵蚀试验观测资料作为模型资料的方法进行试验,研究选沙对径流及侵蚀过程相似的影响。

1.1 试验依据的相似比尺及模型几何尺寸设计

水力侵蚀比尺模拟试验首先应确定试验应遵循的比尺关系,在这方面,高建恩在综合分析坡面降雨径流、侵蚀泥沙运动、入渗等规律的基础上,依据水力模型试验相似三定律,推导了黄土高原小流域模型设计的比尺关系。在正态条件下,满足上述相似比尺建造的延安燕沟康家圪崂小流域模型,初步验证表明^[12-13],其降雨、汇流、产沙及输沙基本符合实际情况。本研究在上述比尺关系的基础上,结合坡面水力侵蚀的特点,给出了黄土坡面水力侵蚀比尺模拟试验应遵循的比尺关系(表 1)。

本文原型土槽采用中科院水保所降雨大厅的大型钢制土槽,其宽 2 m,长 8 m,中间用隔板隔成两部分,即原型实际尺寸为 1 m × 8 m。土槽坡度可在 5° ~ 30° 之间调节,本文采用 10°。考虑到如果坡长过短,径流发育会受到限制,因此本文选取几何比尺 $l = 2.5$,则模型土槽尺寸为 0.4 m × 3.2 m。在正态条件下,将几何比尺 $l = 2.5$ 代入表 1 的关系式可得试验应依据的比尺,结果见表 1。

1.2 降雨相似实现及设计

在坡面流连续和运动方程中,雨强是第一个输入的边界条件,雨强相似是径流过程相似的前提,因此雨强相似必须首先满足。另外,本文通过预降雨的方法控制土壤前期含水量,并在预降雨之后放置一段时间才进行正式试验,土壤表层已形成结皮层。试验开始初期,雨滴的击溅作用已很小。同时由于选择的雨强较大,试验开始后坡面流很快达到平衡,径流一定程度上也消弱了雨滴对表层泥沙的打击。在这种情况下,坡面水力侵蚀以径流冲刷作用为主。基于以上原因,降雨相似以满足雨强相似为主。

试验在中科院水保所降雨大厅侧喷区进行,降雨高度 16 m,可以保证所有的雨滴达到终点速度。降雨的均匀系数在 75% 以上。本文结合黄土高原暴雨发生的频率和标准,原型选用 120 mm/h, 100 mm/h 和 80 mm/h 的 3 个雨强进行试验,雨量控制在 50 mm;模型雨强 i_m 及降雨时间 t_m 通过原型雨强 i_y 、降雨时间 t_y 分别除以雨强比尺 i_r 、降雨时间比尺 t_r 得到,即模型雨强及降雨时间 $i_m = i_y / i_r$, $t_m = t_y / t_r$ 。由于床面变形时间要在含沙量比尺率定之后才能确定,因此本文首先采用水流时间比尺作为本次试验的降雨时间比尺,即降雨时间比尺 $t_r = l / V^{1/2}$ 。为了方便叙述,依据原型所采用的雨强,将以上 3 组试验分称为 120 mm/h 雨强组试验、100 mm/h 雨强组试验和 80 mm/h 雨强组试验。

试验在中科院水保所降雨大厅侧喷区进行,降雨高度 16 m,可以保证所有的雨滴达到终点速度。降雨的均匀系数在 75% 以上。本文结合黄土高原暴雨发生的频率和标准,原型选用 120 mm/h, 100 mm/h 和 80 mm/h 的 3 个雨强进行试验,雨量控制在 50 mm;模型雨强 i_m 及降雨时间 t_m 通过原型雨强 i_y 、降雨时间 t_y 分别除以雨强比尺 i_r 、降雨时间比尺 t_r 得到,即模型雨强及降雨时间 $i_m = i_y / i_r$, $t_m = t_y / t_r$ 。由于床面变形时间要在含沙量比尺率定之后才能确定,因此本文首先采用水流时间比尺作为本次试验的降雨时间比尺,即降雨时间比尺 $t_r = l / V^{1/2}$ 。为了方便叙述,依据原型所采用的雨强,将以上 3 组试验分称为 120 mm/h 雨强组试验、100 mm/h 雨强组试验和 80 mm/h 雨强组试验。

1.3 选沙及试验方法

模型沙的选择方法主要有依据悬浮相似为主的选沙方法和依据起动相似为主的选沙方法。选沙要求原型沙、模型沙各个粒径级的沙粒都应满足相似要求,由于中值粒径沙粒具有一定的代表性,本试验首先检验所选模型沙中值粒径是否满足相似要求,在所选模型沙的中值粒径满足相似之后,再检验该模型沙其它各个粒径级的沙粒是否也满足相似。

模型沙选定之后,首先选用 120 mm/h 雨强组试验研究选沙对侵蚀过程相似的影响,并为后续的试验确定含沙量比尺。如果侵蚀过程不满足相似,则需重新选沙。如果侵蚀过程满足相似要求则在 120 mm/h 雨强组试验的基础上依次选用 100 mm/h 和 80 mm/h 两组雨强进行试验。

1.4 试验观测方法

原型沙选用杨凌区茂陵村黄土(颗粒组成见图 1),过 1 cm 孔径筛子。试验采用分层填土法,每层约 5 cm,

表 1 试验应依据主要比尺

名称	比尺关系式	依据的比尺	备注
几何比尺	l	2.5	正态
雨强比尺	$i_r = l^{1/2}$	1.58	
入渗比尺	$i_r = l^{1/2}$	1.58	
土壤含水量比尺		1	
水流时间比尺	$t_r = l^{1/2}$	1.58	
流速比尺	$v_r = l^{1/2}$	1.58	
流量比尺	$q_r = l^{5/2}$	9.88	
起动相似	$v_{c,r} = v_c = v / l^{1/2}$	1.58	
含沙量比尺	s		率定
产沙量比尺	$s = s_r \cdot l^3$		率定后确定
床面变形时间比尺	$t_r = t / s$		率定后确定

共 8 层 40 cm,容重控制在 1.3 g/cm³ 左右。试验过程中,用秒表测定产流、径流停止时间;用采样法测定径流量、含沙量,即用 2 000 ml 量筒在出口处取样,前 5 个样,每 1 min 取 1 个样,后面约 2~3 min 取 1 个样,每个样取 5 s 左右,读出浑水体积后倒入小桶,待泥沙沉淀后移去上层清水,移入饭盒烘干,用干土重除以浑水体积既得某一时刻含沙量。土壤含水量利用 TDR 测出。每次试验之前预降雨,将土壤含水量控制在饱和含水量附近,并放置一段时间再进行试验。

各图中原型数据为实测值,模型数据为模型实测值乘以表 1 中相应相似比尺的相似转换值,以便和原型数据对比;含沙量比尺选用 120 mm/h 雨强组试验确定的含沙量比尺。

2 选沙对侵蚀过程相似的影响研究

2.1 悬浮相似选择的模型沙对侵蚀过程相似的影响研究

2.1.1 选沙 降雨条件下,坡面水力侵蚀泥沙运动是一个复杂的过程,悬移质和推移质共存,但选沙时很难同时满足悬浮相似和起动相似。本文首先选用悬浮相似为主的方法进行选沙。

由于原型和模型沙颗粒较细,90%以上的颗粒小于 0.1 mm,因此悬浮相似可以选取 Storks 滞留区的静水沉降公式,通过利用相似原理对沉降公式进行相似变化,可以得出依据悬浮相似选沙应遵循的比尺关系式^[12],即粒径比尺应满足:

$$d = l^4 \tag{1}$$

图 1 模型和原型土壤颗粒级配

几何比尺 $l = 2.5$,则 $d = 1.257$ 。经检测原型沙中值粒径 $d_{50y} = 0.01495$ mm,要求模型沙的中值粒径 d_{50m} 应为 0.01189 mm。经过选沙,杨凌法喜村土壤中值粒径为 0.01163 mm,基本满足中值粒径相似要求,另外由图 1 可以看出,该模型沙的颗粒级配和理论要求级配基本符合,可见该模型沙符合悬浮相似选沙的粒径要求。

在选择模型沙满足悬浮相似选沙粒径要求的基础上,本文利用具有黄土资料的沙玉清泥沙起动公式^[14]验证所选择的模型沙是否满足起动相似,沙玉清公式是概括散粒体和粘性细泥沙的统一起动流速公式。起动相似要求起动流速比尺 $v_c = 1.58$ 。

由表 2 可以看出,依据悬浮相似选择的模型沙不能满足起动相似,本文通过试验研究该模型沙对坡面水力侵蚀侵蚀产沙过程相似的影响,并验证其是否满足起动相似要求。

2.1.2 试验结果分析 按照试验设计,首先选用 120 mm/h 雨强进行试验,试验参数见表 3,径流、泥沙过程见图 2、图 3。

表 2 悬浮相似选择模型沙起动流速和原型对比

粒径百分比/ %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
原型沙起动流速/(m·s ⁻¹)	0.558	0.401	0.295	0.228	0.197	0.168	0.158	0.139	0.123
模型沙起动流速/(m·s ⁻¹)	0.486	0.349	0.267	0.219	0.190	0.159	0.137	0.123	0.107
v_c	1.15	1.15	1.11	1.04	1.04	1.06	1.16	1.13	1.15
v_c 平均	1.11								

通过图 2-4 及表 3 可以看出:(1)利用依据悬浮相似选择的模型沙进行的试验,在雨强、土壤含水量等边界条件满足相似的前提下,径流过程满足相似要求(图 2)。(2)原型和模型试验侵蚀产沙的颗粒级配也基本满足粒径相似要求。但原型模型试验的含沙量比尺在 10 以上,在此前提下床面变形时间比尺 t 较大,模型降雨时间只有 2 min 左右,这显然是不合理的,且模型侵蚀产沙过程和原型相差也较大(图 3)。

表 3 依据悬浮相似选沙结果进行的试验参数表

	实测雨强/(mm·h ⁻¹)	相似要求模型雨强/(mm·h ⁻¹)	土壤含水量/ %	含沙量比尺
原型	129.6	-	18.9	14.6
模型	85.7	82.0	19	

注:相似要求模型雨强为原型实测雨强除以雨强比尺之后的值,以便检验模型实测雨强是否满足雨强相似。

可见本文依据悬浮相似选择的模型沙,经沙玉清公式检验,其无法满足起动相似。利用该模型沙进行的试验也表明原型模型的侵蚀产沙过程偏离较大,无法满足侵蚀过程相似,建议用起动相似选沙方法来选择模型沙。

2.2 起动相似选择的模型沙对侵蚀过程相似的影响研究

2.2.1 选沙 依据起动相似的选沙方法要求,起动流速比尺 v_c 满足:



$$v_c = v = \frac{1}{l}^{1/2} \quad (2)$$

图 2 模型流量过程和原型对比

图 3 模型含沙量过程和原型对比

图 4 原型模型产沙级配对比

起动相似选沙方法利用沙玉清公式计算模型沙起动流速是否满足起动相似要求。经计算原型沙起动流速为 0.197 m/s, $l = 2.5$, 则要求模型沙的起动流速应为 0.125 m/s。通过选沙, 延安康家沟土壤的中值粒径约为 0.0286 mm, 起动流速为 0.122 m/s, 基本满足相似要求。通过表 4 可以看出, 其它各个粒径级的沙粒也大致满足相似要求。但该模型沙粒径较原型沙粗, 粒径比尺约为 0.53, 不能满足悬浮相似要求, 但考虑到坡面水力侵蚀的泥沙一旦起动就会在径流作用下起动输移, 因此本文采用该模型沙进行试验, 验证其是否能满足侵蚀过程相似。

表 4 起动相似选择模型沙起动流速和原型对比

粒径百分比/ %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
原型沙粒径/ mm	0.0018	0.0035	0.0065	0.011	0.01495	0.021	0.024	0.033	0.045
模型沙粒径/ mm	0.0029	0.0077	0.015	0.022	0.0286	0.036	0.046	0.055	0.072
原型沙起动流速/ (m · s ⁻¹)	0.558	0.401	0.295	0.228	0.197	0.168	0.158	0.139	0.123
模型沙起动流速/ (m · s ⁻¹)	0.365	0.227	0.164	0.138	0.122	0.111	0.102	0.096	0.090
v_c	1.53	1.77	1.80	1.65	1.62	1.51	1.56	1.45	1.37
v_c 平均	1.58								

2.2.2 试验结果分析 按照试验设计, 依次选用 120 mm/h、100 mm/h 和 80 mm/h 三组雨强进行试验, 研究起动相似选择的模型沙对侵蚀过程相似的影响, 试验参数见表 5, 径流及侵蚀过程见图 5 - 10。

从图 5 - 7 及表 5 的数据可以看出, 120 mm/h 雨强组和 80 mm/h 雨强组试验, 雨强、土壤前期含水量等边界条件满足相似要求, 径流过程也满足相似。相比 100 mm/h 雨强组试验由于模型试验没有达到相似要求雨强, 偏小达 14% 以上, 这直接导致了流量的偏离(图 6), 但这种偏离可以通过严格控制降雨相似来消除。

从图 8 - 10 及表 5 的数据可以看出, 120 mm/h 和 80 mm/h 雨强组试验, 在径流过程满足相似的前提下, 侵蚀产沙过程也基本满足相似要求, 而 100 mm/h 雨强组试验由于模型流量过程偏离, 进而导致含沙量过程的偏离(图 9), 但偏离不大。通过图 11 - 14 及表 5 的数据可以看出, 侵蚀产沙的颗粒级配基本满足相似要求; 120 mm/h 雨强组试验模型地形和原型有所偏差(图 14), 但侵蚀量的模拟结果基本满足相似要求。

由此可见, 利用依据起动相似选择的模型沙进行的试验, 在边界条件(包括雨强, 土壤含水量等)相似得到满足的情况下, 径流和侵蚀产沙过程满足相似要求。在水力侵蚀比尺模拟试验中宜通过起动相似的方法选择模型沙。

表 5 依据起动相似选沙结果进行的试验参数表

	实测雨强/ (mm · h ⁻¹)	相似要求模型雨强/ (mm · h ⁻¹)	土壤含水量/ %	产沙量/ kg	含沙量比尺
原型	129.6	-	18.9	89.3	
模型	85	82.0	19.5	83.4	
原型	99.6	-	18.5	29.7	
模型	53.7	63.0	19.3	19.2	1.1
原型	82.9	-	19.1	8.4	
模型	56	52.5	19.6	9.8	

注: 相似要求模型雨强为原型实测雨强除以雨强比尺之后的值, 以便检验模型实测雨强是否满足雨强相似。

图 5 120mm/h 雨强组试验流量过程对比

图 6 100mm/h 雨强组试验流量过程对比

图 7 80 mm/h 雨强组试验流量过程对比

图 8 120 mm/h 雨强组试验
含沙量过程对比

图 9 100 mm/h 雨强组试验
含沙量过程对比

图 10 80 mm/h 雨强组试验
含沙量过程对比

图 11 120 mm/h 雨强组试验
产沙级配对比

图 12 100 mm/h 雨强组试验
产沙级配对比

图 13 90 mm/h 雨强组试验
产沙级配对比

3 结论

(1) 在雨强、入渗等边界条件满足相似的前提下,无论是利用满足起动相似还是悬浮相似选择的模型沙进行的试验,径流过程相似都可满足相似。

(2) 由于黄土高原土壤颗粒比较细,受雨滴打击结皮及本身粘性的影响,利用悬浮相似选沙方法选择的模型沙,经检验不能满足起动相似要求,侵蚀过程也不能满足相似要求;依据起动相似选择的模型沙进行的试验,在边界条件相似得到满足的情况下,径流和侵蚀过程都满足相似要求。水力侵蚀比尺模拟试验宜通过起动相似的方法选择模型沙。

(3) 试验结果表明,起动相似在降雨径流调控模拟试验中的含沙量过程、侵蚀地形相似起着重要作用,但降雨条件下泥沙起动的研究是个空白,建议加强此方面的研究。

参考文献:

- [1] Mamisao J P. Development of Agricultural Watershed by Similitude[D]. Ames, IA: M. S. Thesis, Iowa State College, 1952:10-30.
- [2] Yen B C, Chow V T. A laboratory Study of Surface Runoff due to Moving Rainstorms[J]. Water Resources Research, 1969,5(5):27-35.
- [3] Chery D L. Construction, Instrumentation, and Preliminary Verification of a Physical Hydrological Model[R]. USDA - ARS and Utah State Univ. Water Research Lab. Report Logan, Utah, USA., 1965:5-10.
- [4] Grace R A, Eaglson P S. Similarity Criteria in the Surface Runoff Process[R]. MIT, Hydro-dynamic Lab, Technical Report NO. 77, 1965:30-42.
- [5] 沈冰,李怀恩,江彩萍,等.论水蚀试验的相似性研究[J].水土保持学报,1997,3(3):94-96.
- [6] 蒋定生,周清,范兴科,等.小流域水沙调控正态整体模型模拟实验[J].水土保持学报,1994,8(2):25-30.
- [7] 石辉,田均良,刘普灵.小流域坡沟侵蚀关系的模拟试验研究[J].水土保持学报,1997,3(1):30-33.
- [8] 袁建平,雷廷武,蒋定生,等.不同治理度下小流域正态整体模型试验:工程措施对小流域径流泥沙的影响[J].农业工程学报,2000,16(1):22-25.
- [9] 张红武,徐向舟,张欧阳.黄土高原沟道坝系模型设计方法[J].人民黄河,2005,27(12):1-2(17).
- [10] 徐向舟,张红武,张羽,等.坡面水土流失比尺模型相似性的试验研究[J].水土保持学报,2005,19(1):25-27.
- [11] 管新建,姚文艺,李勉,等.坡面水蚀比尺模型室内外相似性试验研究[J].水土保持学报,2007,21(6):43-46.
- [12] 高建恩,杨世伟,吴普特,等.水力侵蚀物理模拟试验相似率的初步确定[J].农业工程学报,2006,22(1):27-31.
- [13] 高建恩,吴普特,牛文全,等.黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J].农业工程学报,2005,21(10):41-45.
- [14] 武汉水利电力学院.河流泥沙工程学[M].北京:水力电力出版社,1981.

责任编辑:李鸣雷 刘英