

坡面薄层含沙水流水动力学参数提取的方法

尹艳¹, 高建恩^{1,2}, 李慧娟², 韩赛奇¹, 周媚芳³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对坡面径流水深浅(1~5 mm)和水动力学参数(流速、水深等)提取困难, 给坡面侵蚀径流水流结构、能量耗散及泥沙输移等的深入研究带来困难的问题, 基于水动力学原理和相似性理论, 通过“非常规比尺模型”将径流水深进行放大, 来研究坡面薄层含沙水流的水流相似过程。结果表明: (1) 当薄层含沙水流水深放大2.5倍, 含沙量在10~320 kg/m³时, 薄层含沙水流原型和模型的水面线(阻力)、流速、侵蚀地形的误差分别为0~0.1%, 0.1%~5.3%, 0.9%~4.9%, 误差均在允许范围之内, 原型和模型满足几何、运动等相似比尺转换关系; (2) 水深在0.5~1.25 cm时, 薄层含沙水流为紊流, 原型和模型的流速垂向分布满足对数分布, 可以用同一方程进行表达; (3) “非常规比尺模型”可以作为一种方法应用到薄层含沙水流的水动力学参数提取、水流结构、能量耗散、泥沙输移等的深入研究过程中。

关键词: 薄层含沙水流; 水动力学; 非常规比尺模型; 相似性

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0025-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.005

Study on Extraction Methods for Hydrodynamic Parameters of Overland Sediment Flow

YIN Yan¹, GAO Jian'en^{1,2}, LI Huijuan², HAN Saiqi¹, ZHOU Meifang³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Due to the difficulty of extracting runoff depth (1 ~ 5 mm) and hydrodynamic parameters (velocity, depth, etc), it is difficult to study the water flow structure, energy dissipation and sediment transport of runoff erosion on slope surface. Based on the principle of hydrodynamics and similarity theory, the flow similarity process of overland sediment flow on slope surface was simulated by enlarging the depth of runoff with non-conventional scale model. The results were as follows: (1) When the water depth of overland sediment flow was enlarged by 2.5 times and sediment content was 10 ~ 320 kg/m³, the errors of surface line (resistance), velocity and erosion topography from the prototype and model of overland sediment flow were 0 ~ 0.1%, 0.1% ~ 5.3% and 0.9% ~ 4.9%, respectively, all the errors of which were within the allowable ranges. The prototype and the model fitted the similarity transform relationship, such as geometry and motion. (2) When the water depth was 0.5 ~ 1.25 cm, the overland sediment flow was turbulent, the vertical distribution of velocities of the prototype and the model fitted the logarithmic distribution, which could be expressed by the same equation. (3) The non-conventional scale model could be used for the further studies of hydrodynamic parameters extraction, flow structure, energy dissipation and sediment transport of the overland sediment flow.

Keywords: overland flow; hydrodynamic; non-conventional scale; similarity

坡面径流水深浅(毫米级)和水动力学参数(水深、流速)量测困难, 导致水流结构、能量耗散、泥沙运动等的深入研究难以进行, 探寻一种能有效解决这些困难的方法已是坡面径流侵蚀研究领域的重要内容

之一。目前, 研究坡面径流侵蚀的方法包括野外实地观测、数值模拟和室内实体模型试验等。野外实地观测方法需要较长的时间和大量的观测资料, 通过统计分析来研究事物的本质规律^[1], 其缺少可控性, 受外

收稿日期: 2018-08-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703); 陕西省自然科学基金重大基础研究项目(2016ZDJC-20); 国家自然科学基金项目(41877078, 41371276); 水土保持研究所中国科学院创新工程重要方向项目(A315021615)

第一作者: 尹艳(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事非常规比尺模型研究。E-mail: 1130439776@qq.com

通信作者: 高建恩(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事非常规比尺模型研究。E-mail: gaojianen@126.com

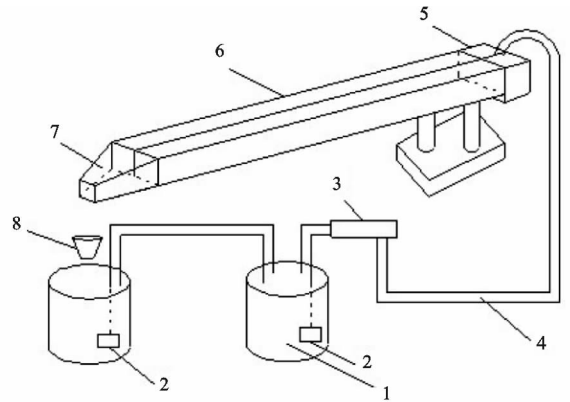
界各种因素的影响较大,而且周期长、投资大,因而限制了坡面径流水动力学领域的深入研究。数值模拟的实现要求必须建立整套的控制方程、封闭条件以及有效的计算方法,而坡面径流调控和水力侵蚀的许多方面都得依靠经验,这些经验对数值模拟的封闭也是必不可少的,如果应用不当就会脱离实际^[2],并且实际中由于下垫面、降雨、产流、输沙等的复杂性,进行准确的数值模拟还难以实现。因此,坡面径流侵蚀水动力学研究领域需要一种简化周期、节约成本、能在短期内对坡面径流性质进行调控和研究的新方法。而室内实体模型试验可以满足以上要求,室内实体模型试验包括缩小比例的模型试验和放大比例的模型试验,其中缩小比例的模型试验研究方法在坡面径流侵蚀研究中已有较多的研究成果,前人^[3-9]通过理论分析和试验,初步得出了坡面径流侵蚀遵循的相似条件和比尺关系;徐啸^[10]研究得出波、流共同作用下的浑水,要么选择小比尺的正态模型,要么选择变态模型。但是比尺模型研究中如何将成果定量推广到原型还需进一步深入研究。针对该问题,高建恩等^[11-12]、李书钦等^[13-14]在已有的比尺模型基础上,提出了一套完整的黄土高原水力侵蚀模拟应遵循的比尺转换关系,同时在室内对梯田侵蚀进行反演^[15],得出模型和原型符合较好,解决了模拟结果定量向原型转换的问题。尽管缩小比例的室内实体模型方法在坡面径流侵蚀研究中的应用得到众多学者认可,但是缩小比例的比尺模型方法依然不能解决坡面径流水动力学参数提取困难的问题。为了解决该问题,李慧娟^[16]首次使用一种放大比例的实体模型方法,即“非常规比尺模型”,利用该模型将水深放大一定比例来测定坡面径流的水动力学参数,然后通过比尺转换关系可以推出原型的水动力学参数,该方法初步在清水条件下进行了验证,结果表明“非常规比尺模型”在获取水动力学参数方面是可行的。为了进一步确定“非常规比尺模型”方法的适用性,本研究将针对实际中浑水条件下坡面径流的特点,通过“非常规比尺模型”将毫米级的薄层含沙水流水深放大,对坡面薄层含沙水流进行非常规比尺转换关系设计以及相似性验证,为薄层含沙水流的水动力学参数提取提供一种可探索的方法。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验装置由泥沙搅拌机、变坡矩形水槽、循环装置 3 部分组成(图 1)。泥沙搅拌机为圆柱形,高 1.2 m,半径 0.6 m,总体积为 1.36 m³。由于薄层径流宽深比较大,水槽设计中只需考虑几何比尺中的垂直比尺即水深比尺,因此试验原型和模型水槽均长 8.0 m、宽 0.25 m、高 0.15 m,水槽的长度可以满足水流在运动过程中达到完全稳定的均匀流状态,水槽槽壁

为有机玻璃板,原型水槽槽底为光滑的铝塑板,模型水槽槽底为 100 目的砂纸。



注:1为水箱(内设搅拌器);2为泥浆泵;3为分液箱;4为调节阀;5为稳流槽;6为水槽;7为集流槽;8为接样桶。

图 1 试验装置示意

1.2 试验材料

试验原型沙选用的是延安市安塞区楼坪乡的土壤,模型沙选用的是延安市万花山的土壤。试验前都过 0.5 cm 的筛子,去除土样中较大草石块等杂质,同时采用黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 MS-200 的激光粒度仪对试验土壤进行颗粒分析,可知原型安塞区楼坪乡的土壤中心粒径为 $d_{50}=0.0214$ mm,模型延安万花山土壤中心粒径为 $d_{50}=0.0270$ mm,满足模型沙选择要求,原型沙和模型沙的颗粒级配曲线见图 2。

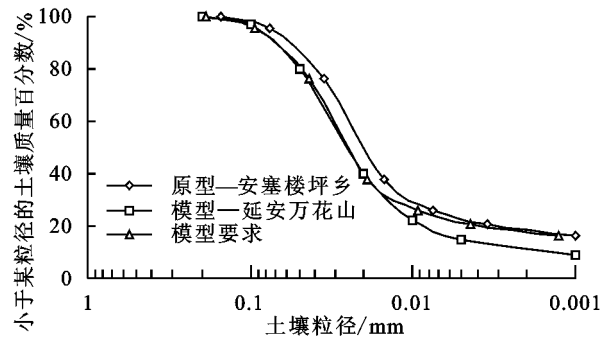


图 2 土壤粒径级配曲线

1.3 试验方法

试验在西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的人工模拟降雨大厅进行,开始于 2017 年 5 月 10 日。每组试验之前通过改变流量来确定所需要的水深,待水深确定且水流稳定后,开始测定水流表层最大流速、水深、含沙量、流量和泥沙淤积高度。

表层最大流速采用高锰酸钾染色示踪法,从坡顶自上而下每相隔 1 m 设置一个观测断面,共设置 8 个观测断面(图 3),并沿横向每隔 5 cm 平分成 5 个测段(图 3),将 5 个测段的平均值作为该观测断面流速的测量值,中间 6 个观测断面的平均值作为该次试验的表层最大流速平均值。

水深采用重庆水仪器厂生产的水位测针测定,

测定精度 0.01 mm,从坡顶自上而下依次在每个观测断面的中间位置测定水深,每个观测断面分别在糙度源的前方、后方和一侧各测定 1 次,将 3 次的平均值作为该观测断面的平均水深,中间 6 个观测断面水深的平均值作为该次试验的水深测量值。

含沙量采用烘干法测定,试验开始后在出口处接

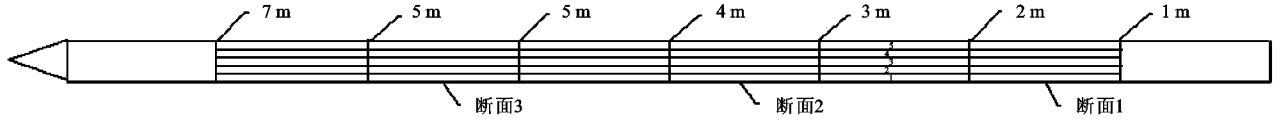


图 3 试验水槽断面示意

1.4 参数设定

试验主要分为 2 个阶段,第 1 阶段是坡面薄层含沙水流非常规比尺设计阶段,第 2 阶段是坡面薄层含沙水流非常规比尺模型相似性验证阶段。第 2 阶段中,根据坡面薄层含沙水流的实际水深特点,原型水深设置为 0.5 cm,通过“非常规比尺模型”将水深扩大 2.5 倍,则对应的模型水深为 1.25 cm。根据黄土高原侵蚀产沙情况,设置 4 组含沙量,原型含沙量(S_y)分别为 10, 20, 40, 80 kg/m^3 ,通过含沙量比尺转换,对应的模型含沙量(S)分别为 40, 80, 160, 320 kg/m^3 。

2 结果与分析

2.1 坡面薄层含沙水流非常规比尺模型设计

2.1.1 非常规比尺模型设计 吴普特等^[2]、高建恩等^[11]基于降雨、径流、侵蚀、输移及入渗的水动力学原理,根据水力侵蚀模拟的几何、运动及动力相似要求,通过对水流、泥沙、土壤水的连续方程、运动方程及床面变形方程的分析,结合相似论的基本原理,给出了一套黄土高原小流域水力侵蚀模拟应遵循的主要比尺关系:

几何相似:

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda_l \quad (1)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z 、 λ_l 为几何相似比尺,均无量纲。

水流运动相似:

$$\lambda_v = \lambda_l^{\frac{1}{2}}, \lambda_f = 1 \text{ 或 } \lambda_n = \lambda_l^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: λ_v 为流速比尺,无量纲; λ_f 为阻力相似比尺。

降雨径流相似:

$$\lambda_i = \lambda_l^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: λ_i 为雨强相似比尺,无量纲。

侵蚀产沙运动相似:

$$\lambda_v = \lambda_{v^*} = \lambda_w = \lambda_{v_c} = \lambda_l^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: λ_{v^*} 、 λ_w 、 λ_{v_c} 分别为摩阻流速比尺、沉速比尺、泥沙起动流速比尺,均无量纲。

冲淤变形相似:

$$\lambda_t' = \frac{\lambda_t'}{\lambda_s} \lambda_l \quad (5)$$

式中: λ_t' 为冲淤时间比尺,无量纲; λ_t' 为泥沙干容重比尺,无量纲; λ_s 为含沙量比尺,无量纲; λ_l 为水流运动时间比尺,无量纲。

样,每次接 5 s,每隔 3 min 接 1 次,总共接 5 次,称其质量,静置 14 h 后将上清液倒掉,剩下的样品倒入所对应的铝盒中,在 105 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘 24 h 后在称重。

试验中,收集 3 次径流量,取平均值作为流量值。每组试验结束后用钢尺测定沿程泥沙淤积高度和出口断面的泥沙淤积高度,得出侵蚀地形。

降雨入渗相似:

$$\lambda_\theta = 1 \quad (6)$$

式中: λ_θ 为土壤含水量比尺,无量纲。

本试验在黄土高原小流域模型的基础上,结合试验中的实际情况,以水深相似比尺作为几何比尺(坡面径流宽深比大,二维性强,几何比尺只需考虑垂直比尺即水深比尺),对坡面薄层含沙水流的水动力学参数进行了非常规比尺设计(表 1)。

表 1 非常规比尺模型比尺设计

参数	比尺符号	比尺值	备注
几何相似	λ_h	0.4	正态
水力坡降相似	λ_j	1	
流速相似	$\lambda_v = \lambda_l^{\frac{1}{2}}$	0.632	
流量相似	$\lambda_Q = \lambda_l^{\frac{3}{2}}$	0.253	
阻力相似	λ_f	1	
糙率相似	$\lambda_n = \lambda_l^{\frac{1}{2}}$	0.858	
悬移运动相似	$\lambda_d = \frac{\lambda_l^{\frac{1}{2}} \lambda_h^{\frac{1}{2}}}{\lambda_{\rho_s}^{\frac{1}{2}} - \rho}$	0.795	
起动相似	$\lambda_v = \lambda_l^{\frac{1}{2}}$	0.635	
冲淤变形相似	$\lambda_t' = \frac{\lambda_t'}{\lambda_s} \lambda_l$	2.801	
含沙量比尺相似	λ_s	试验率定	

注: λ_h 、 λ_j 、 λ_Q 、 λ_v 、 λ_n 、 λ_f 、 λ_d 、 λ_v 、 λ_t' 、 λ_s 、 λ_l 分别为几何比尺、水力坡降比尺、流量比尺、流速比尺、糙率比尺、阻力比尺、粒径比尺、冲淤时间比、含沙量比尺和水流运动时间比尺,公式中的变量均为无量纲;新建田块横向水平、纵向水平的比降范围为 2%~5%^[16],因此本试验原型和模型的坡度均选择 2°。

2.1.2 含沙量比尺确定 本研究的含沙量比尺通过前期的预备试验进行率定,分别对原型和模型水槽进行冲刷试验,原型水深控制在 0.5 cm,模型水深控制在 1.25 cm,通过改变含沙量的大小,来控制泥沙在水流中的冲淤状态。当原型和模型的冲淤状态相似时(不冲不淤状态和淤积状态),在出口处进行接样,每隔 3 min 接 1 次,总共接 5 个样,试验结束后烘干称重。通过前期的预备试验进行率定,在 2 种泥沙状态下,其中各个时间点原型和模型的含沙量比值均在 0.25 左右,因此取其平均值作为含沙量比尺值,即 0.25。

在初步确定了含沙量比尺的基础上,同时在预试验

中做了含沙量比尺的验证试验。原型含沙量设置为 10, 40, 80 kg/m^3 , 分别在 4 组水深下进行验证(图 4), 通过对 3 组含沙量条件下原型和模型进行误差计算, 可知其

误差范围在 0.05%~5.30%, 基本都在允许误差范围内(5%), 则原型和模型之间满足所率定的含沙量比尺, 即本研究通过试验率定的含沙量比尺是合理的。

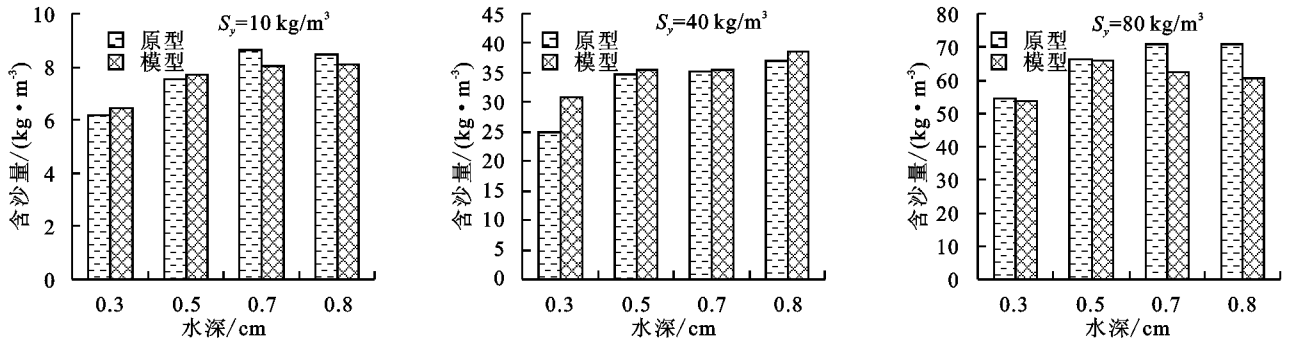


图 4 含沙量比尺验证

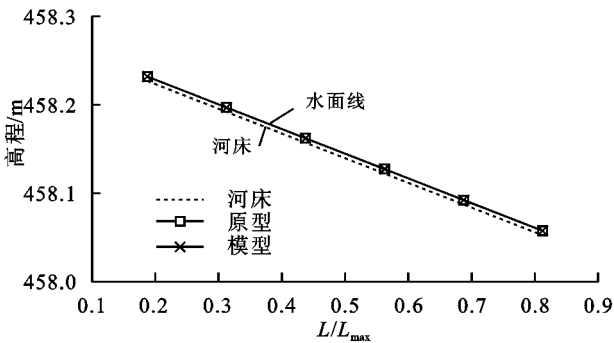
2.1.3 糙率相似的实现 在正式进行试验之前, 需要对原型和模型的糙率进行率定, 以保证糙率相似。试验原型和模型均采用光滑的铝塑板作为下垫面, 以原型水深 0.5 cm、模型水深 1.25 cm 为依据进行糙率的率定。首先在原型水槽进行放水, 通过控制流量来调整水深, 使水深达到 0.5 cm 时测定流量 Q_p 和沿程水位; 然后给模型水槽铺设粒径最小的砂纸, 放水使水深达到 1.25 cm, 测定模型流量 Q_m 和沿程水位; 不断调整模型砂纸的目数, 当原型和模型流量比值满足流量比尺, 即 $\frac{Q_p}{Q_m} = 2.53$ 时, 验证原型和模型的水面线, 从图 5 可以看出, 原型和模型水面线基本相似, 则糙率率定结束, 最终原型的下垫面为光滑的铝塑板, 模型的下垫面为 100 目的砂纸。

2.2 模型验证

“非常规比尺模型”在清水条件下可以作为一种坡面径流动力学参数提取的方法^[16], 为了进一步研究“非常规比尺模型”在含沙条件下是否可以作为一种水动力学参数提取的方法, 本研究将在所设计的坡面径流侵蚀非常规比尺转换关系的基础上, 对坡面薄层含沙水流的水动力学参数进行相似性验证, 包括径流的流型、流态、水面线、阻力、流速、侵蚀地形等。原型和模型之间通过计算相对误差进行对比其相似性验证结果, 模型试验允许的误差范围为 1%~5%^[17]。

2.2.1 流型及流态相似性验证 在原型水深为 0.5 cm、模型水深为 1.25 cm 条件下, 对 4 组含沙量的流型流态进行相似性验证, 在坡面流研究中, 一般用雷诺数和弗劳德数的大小分别来判定坡面流的流型和流态。

从表 2 可以看出, 当原型水深和模型水深满足几何比尺关系时($\lambda_h = 0.4$), 其原型和模型的雷诺数均大于 1 600, 并在动床雷诺试验中染色剂出现了明显的向周围扩散的现象(图 6), 因此原型和模型均属于紊流。研究发现原型和模型的弗劳德数均大于 1, 表明原型和模型均为急流。因此原型和模型均处于同一流型流态, 即紊流和急流的状态, 满足相似要求的前提条件。



注: L/L_{\max} 为测量点到坡顶的长度(m)与水槽总长度(m)比值。

图 5 原型和模型水面线糙率率定

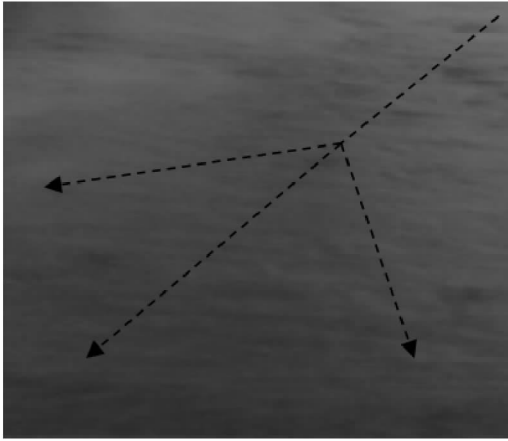
表 2 原型和模型的流型、流态相似性验证

初始含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		水深/cm		雷诺数 Re		弗劳德数 Fr	
原型值	模型值	原型值	模型值	原型值	模型值	原型值	模型值
10.00	40.00	0.50	1.24	1670.84	7803.09	1.60	1.78
20.00	80.00	0.50	1.26	1786.35	7257.05	1.65	1.65
40.00	160.00	0.51	1.26	2338.92	6904.71	2.19	2.19
80.00	320.00	0.50	1.26	2103.66	7471.19	2.05	2.24

2.2.2 水面线相似性验证 在原型水深 0.5 cm、模型水深 1.25 cm 条件下, 取中间 6 个观测断面的水深, 来绘制不同含沙量条件下原型和模型水面线验证图(图 7)。试验中以试验所在地的高程(458 m)为基准点, 测量沿程水位以及河床。从图 7 可以看出, 由

于试验对象为薄层含沙水流, 水深为 0.5 cm, 因此原型和模型的水面线非常接近河床, 且原型和模型的水面线几乎重合, 通过计算误差可知两者之间的相对误差均小于 0.1%, 在误差允许值之内, 即水面线满足相似比尺转换关系。而对于坡面径流而言, 原型和模

型水面线相似反映了原型和模型的阻力相似,两者的阻力满足 $\lambda_f = 1$ 。水面线相似和阻力相似是保证原型和模型相似的一个重要前提。



注:图中箭头为染色剂扩散方向。

图 6 染色剂扩散现象

2.2.3 流速相似性验证 在断面 1、断面 2 和断面 3

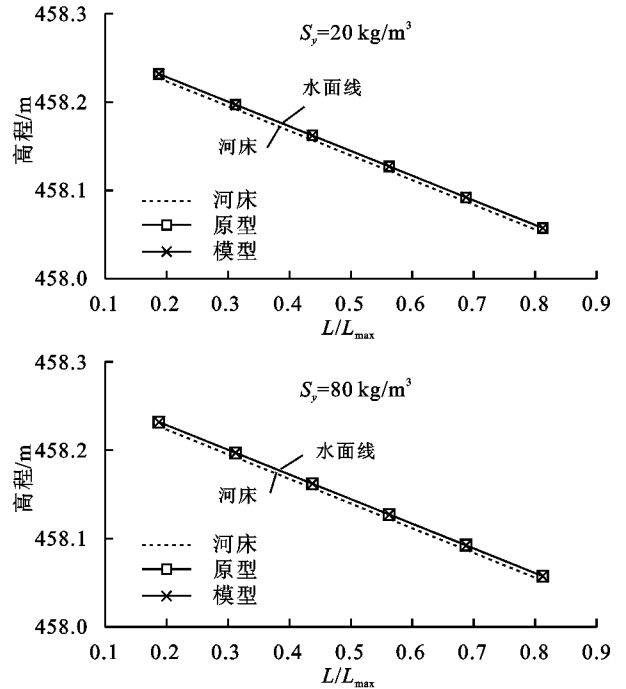
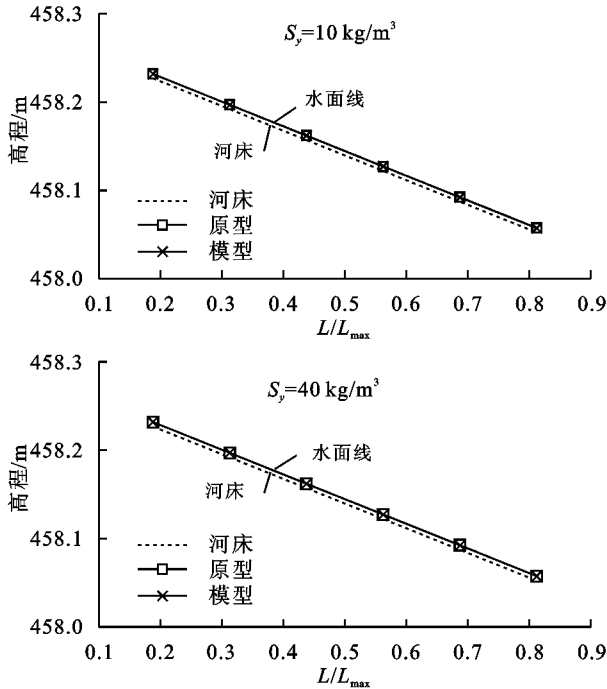


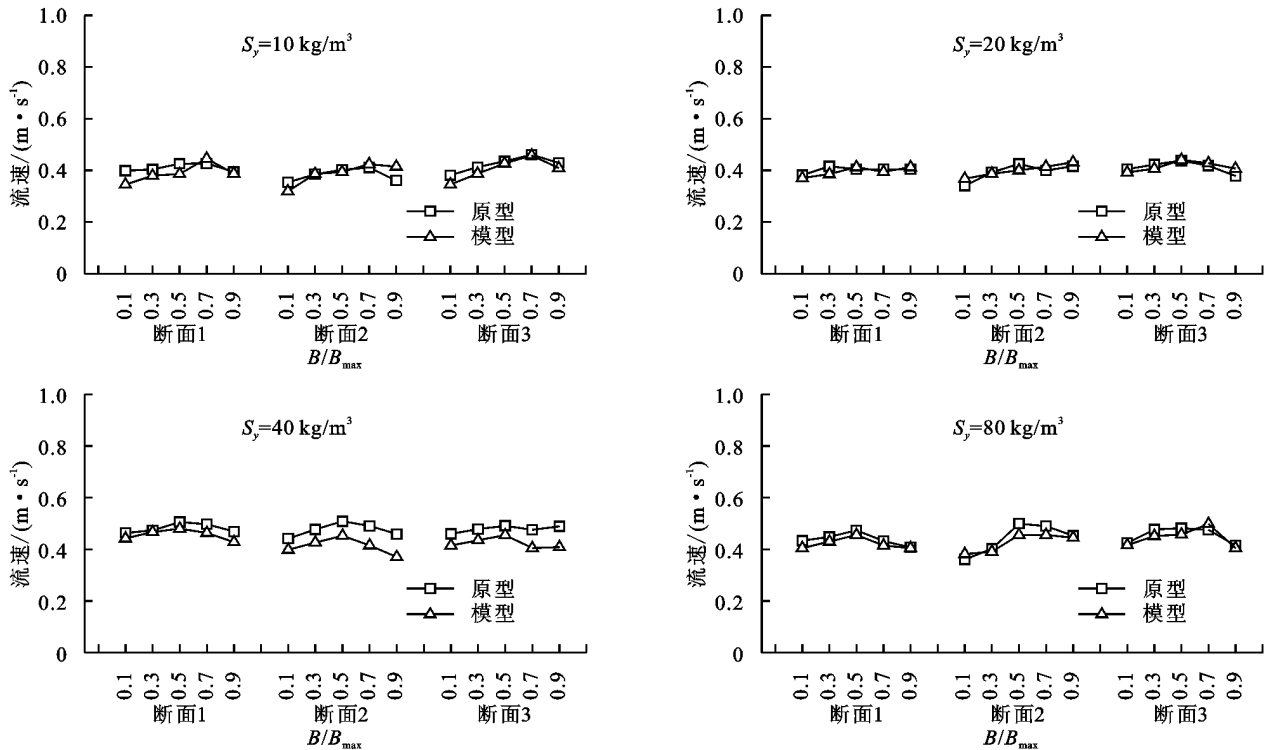
图 7 原型和模型水面线相似性验证

2.2.4 侵蚀地形相似性验证 在沿程和出口处观测泥沙淤积状况,通过前期预试验得出原型含沙量为 20 kg/m^3 ,对应的模型含沙量为 80 kg/m^3 时,原型和模型水流中泥沙均处于不冲不淤的状态。在正式试验中对沿程和出口断面的泥沙淤积状态进行观察和测量,绘制原型和模型的沿程侵蚀地形图和出口断面的侵蚀地形图。

由图 9 可知,原型含沙量分别为 $10, 20 \text{ kg/m}^3$ 试验中,全程未发生淤积,而原型含沙量分别为 $40, 80 \text{ kg/m}^3$ 试验中, $0 \sim 7 \text{ m}$ 几乎没有发生淤积, $7 \sim 8 \text{ m}$ 出口断面处有淤积发生。选取水槽 7.5 m 处,测量其横

的 3 个观测断面(图 3)测定流速的横向分布,在 4 组含沙量条件下绘制流速横向断面分布(图 8)。原型含沙量分别为 $10, 20, 40, 80 \text{ kg/m}^3$ 时,模型和原型的横向断面流速相比误差范围分别为 $0.1\% \sim 3.5\%$, $0.2\% \sim 1.9\%$, $0.4\% \sim 2.3\%$, $0.4\% \sim 5.3\%$ 。当原型含沙量 $S_y < 80 \text{ kg/m}^3$ 时,对于每个断面流速,基本呈现先增加后减小的趋势,这是由于受到来自水槽边壁对水流的阻碍作用,使得其在靠近边壁的流速较小,通过误差分析可知原型和模型之间的误差值均在允许误差范围内。当原型含沙量 $S_y = 80 \text{ kg/m}^3$ 时,由于床面淤积状态较为严重,需考虑水流输沙的随机性,以及淤积状态下泥沙运动测量的本身误差,导致原型和模型的流速横向断面分布中有一个测点的误差超出了允许值。在所设计的含沙量范围内,原型和模型的流速之间满足流速比尺转换关系,即满足 $\lambda_v = \lambda_H^{\frac{1}{2}}$ 。原型和模型流速相似反映了原型和模型的水流运动相似。

向断面侵蚀地形,得到侵蚀地形分布,从图 9 可以看出,原型和模型横向断面侵蚀地形主体和侵蚀沟类型(“U”形)一致,但由于模型尺寸较小,出口断面会受到回水现象和测量等的影响,使得原型和模型的泥沙淤积高度不完全重合。原型含沙量为 40 kg/m^3 条件下,原型和模型侵蚀地形的误差在 $1.6\% \sim 3.8\%$ 范围内,在误差允许范围内;原型含沙量为 80 kg/m^3 条件下,原型和模型的误差在 $0.9\% \sim 4.9\%$ 范围内,也在误差允许范围内,则原型和模型侵蚀地形满足相似性验证。原型和模型的侵蚀地形相似反映了原型和模型的泥沙运动相似。



注: B/B_{\max} 为测量点到水槽左边壁的长度(m)与水槽宽度(m)的比值。

图 8 原型和模型横向断面流速相似性验证

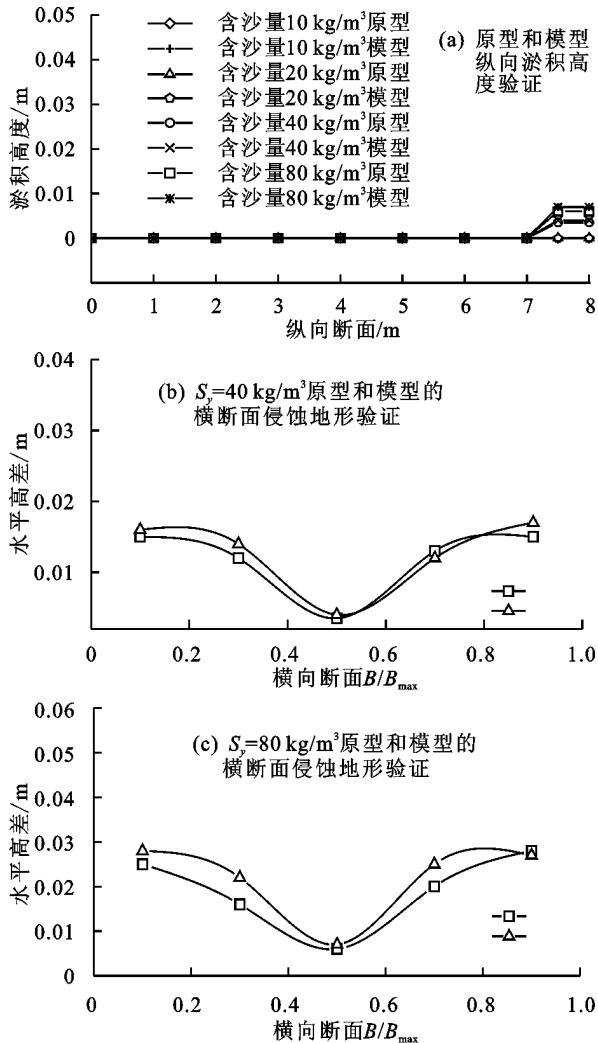


图 9 原型和模型侵蚀地形相似性验证

2.2.5 流速垂向分布相似性验证 由于试验设备和技术有限,试验中只获得了垂向分布的 2 个流速点,分别为表面最大流速和平均流速,通过查阅文献[18]可知,表面流速为水深 h ,平均流速对应 $0.6 h$ 。在对流型的验证可知,坡面薄层含沙水流是紊流,因此坡面流流速垂向分布公式采用对数分布公式(公式(7)),将试验已获得的 2 个流速点代入对数流速分布公式中,可以得出不同含沙量下原型和模型的卡门常数。原型 4 组含沙量下对应的卡门常数分别为 0.213,0.143,0.139,0.136,平均值为 0.158,接近 $1/6$,模型对应的卡门常数分别为 0.224,0.152,0.174,0.157,平均值为 0.177,接近 $1/6$,因此原型和模型流速分布可以用同一物理方程进行表达,取卡门常数为 $1/6$,卡门常数值较小,则说明坡面薄层含沙水流紊动受到限制。

取卡门常数 $1/6$,将水深 $0.2 h, 0.4 h, 0.8 h$ 分别代入公式(7)中,可以得出不同含沙量条件下各个相对水深位置所对应的流速。然后在半对数纸上点绘不同含沙量条件下的流速与相对水深的关系。从图 10 可以看出,4 组含沙量下坡面径流原型和模型的流速和相对水深基本都呈直线关系(相关系数均大于 0.93),原型和模型的点均在直线左右分布。因此进一步说明坡面薄层含沙水流为紊流,原型和模型可以用同一方程表达。即“非常规比尺模型”可以为薄层含沙水流的水动力学参数的提取提供一种可探索的方法。

$$\frac{U_{\max} - U}{U_*} = \frac{l}{k} \ln \frac{h}{y} \quad (7)$$

式中: U_{\max} 为表层最大流速(m/s); U 为测量点流速(m/s); U_* 为摩阻流速(m/s); R 为卡门常数; h/y 为相对水深。

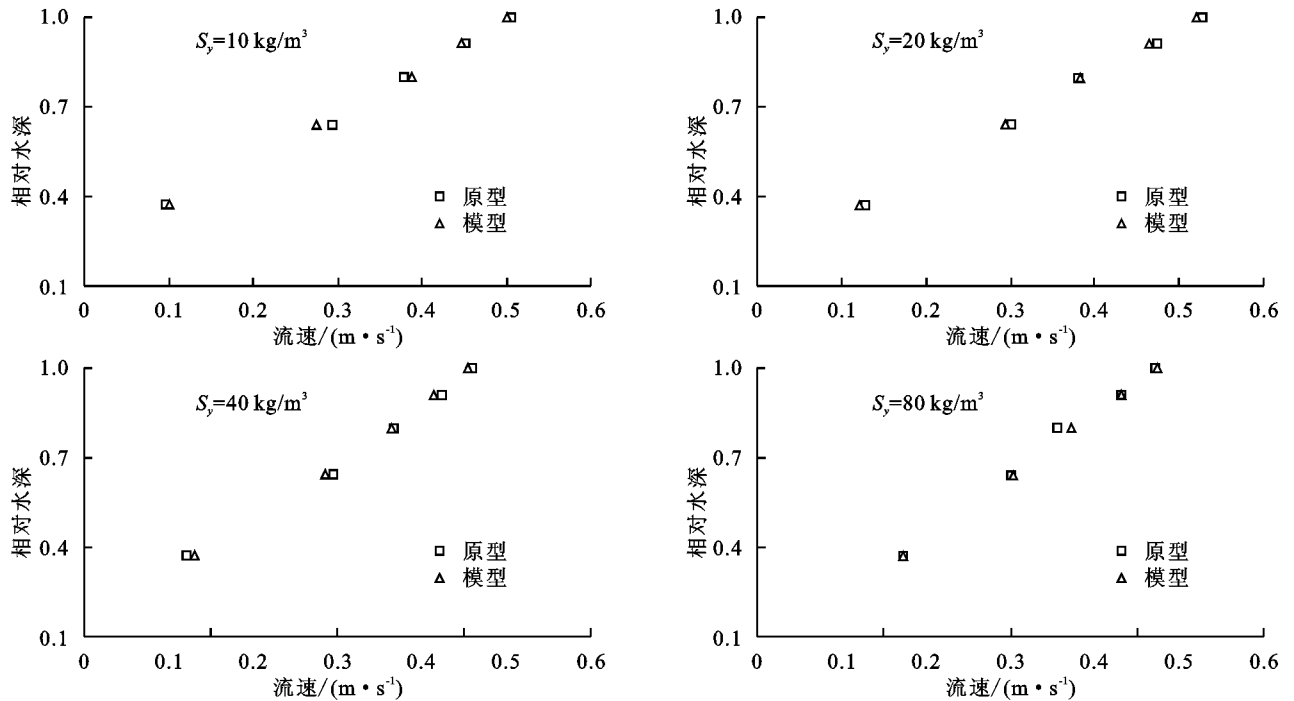


图 10 原型和模型流速垂线分布相似性验证

3 讨论

坡面径流是坡面产生水土流失的主要动力,也是沟道侵蚀动力的主要来源。但是由于水深的限制(水深为毫米级),使得其水动力学参数的提取较为困难,进一步影响径流侵蚀的深入研究。在径流侵蚀研究中用到的实体模型试验,一般都是比尺大于 1 的模型,而“非常规比尺模型”是比尺小于 1 的模型,可以将野外需要观测的参数进行放大,便于测量。本研究在黄土高原小流域水力侵蚀与调控的基础上,建立了比尺小于 1 的坡面薄层含沙水流“非常规比尺模型”,在主要考虑起动相似、挟沙相似、床面变形相似等基础上,提出了坡面薄层含沙水流所遵循的非常规比尺转换关系式。在此基础上,为了进一步验证该模型的适用性,在不同含沙量条件下进行了相似性验证。验证发现,在试验条件下,满足含沙量相似、几何相似和糙率相似等时,其水面线、流速、侵蚀地形的误差均在允许范围之内,使其原型和模型的径流过程满足相似。建立的“非常规比尺模型”可以实现模型向原型的定量转换,为坡面薄层含沙水流水动力学参数的提取提供一种方法,为坡面径流的能量耗散、水流结构、输沙规律等的深入研究提供重要依据。

4 结论

(1)在试验条件下,几何比尺为 0.4 时,坡面薄层含沙水流原型和模型的水面线、流速、侵蚀地形的误差分别为 0~0.1%,0.1%~5.3%,0.9%~4.9%,均在允许值之内,原型和模型满足几何相似、水流和泥沙运动相似,因此本研究所建立的“非常规比尺模型”,可以实现

模型的水动力学参数向原型的定量转换。

(2)水深在 0.5~1.25 cm 时,坡面薄层含沙水流为紊流,原型和模型的流速垂向分布均服从对数分布,且可用同一方程进行表达,卡门常数取值 1/6。

(3)“非常规比尺模型”可以为坡面薄层含沙水流的水动力学参数的确定提供一种可探索的研究方法。

参考文献:

- [1] 袁建平,蒋定生,甘淑.不同治理度下小流域正态整体模型试验:林草措施对小流域径流泥沙的影响[J].自然资源学报,2000,15(1):91-96.
- [2] 吴普特,高建恩.黄土高原水土保持新论[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [3] Chery D L. Construction, instrumentation, and preliminary verification of a physical hydrologic model [R]. USA, Utah State University, 1965.
- [4] Yen B C, Chow V T. A laboratory study of surface runoff due to moving rainstorms [J]. Water Resources Res, 1968, 5(5): 989-1006.
- [5] 雷阿林,王文龙,唐克利.土壤侵蚀模拟实验的若干问题[J].水土保持研究,1998,5(2):127-130.
- [6] 孙三祥,张云霞.降雨及坡面径流模拟试验相似准则[J].农业工程学报,2012,28(11):93-98.
- [7] 张羽,李想,吴腾,等.悬移质动床模型试验含沙量比尺计算方法研究[J].人民黄河,2007,29(12):33-35.
- [8] 黄自强.黄土高原小流域产水产沙实体模型的设计思路[J].人民黄河,2006,28(4):5-6.
- [9] 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.

- Chemoga watershed, Ethiopia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 97: 81-93.
- [5] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):90-97.
- [6] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff; Rainfall simulations on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(15): 2211-2224.
- [7] An J, Zheng F L, Han Y. Effects of rainstorm patterns on runoff and sediment yield processes [J]. *Soil Science*, 2014, 179(6): 293-303.
- [8] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1084-1091.
- [9] Mohamadi M A, Kaviani A. Effect of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.
- [10] 邬铃莉,王云琦,王晨洋,等. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24):157-164.
- [11] Hatfield J L, Allmaras R R, Rehm G W, et al. Ridge tillage for corn and soybean production: Environmental quality impacts [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48: 145-154.
- [12] Liu Q J, An J, Zhang G H, Wu X Y. The effect of row grade and length on soil erosion from concentrated flow in furrows of contouring ridge systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 92-100.
- [13] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 177: 1-11.
- [14] 闫建梅,何丙辉,田太强. 不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20):4027-4035.
- [15] 谢云,林小鹏,刘英娜,等. 槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4):1-6.
- [16] 于兴修,李振伟,刘前进,等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(8):2644-2651.
- [17] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11):124-132.
- [18] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing [J]. *Catena*, 2006, 66: 211-220.
- [19] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of micro-topography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136:1-8.
- [20] Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on inter-rill runoff and erosion [J]. *Catena*, 2006, 67: 68-78.
- [21] Benik S R, Wilson B N, Biesboer D D, et al. Performance of erosion control products on a highway embankment[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2003, 46(4): 1113-1119.
- [22] Reichert J M, Norton L D. Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol [J]. *Soil Research*, 2013, 51: 1-9.
- [23] 张科利,唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1):9-15.
- (上接第 31 页)
- [10] 徐啸. 波、流共同作用下浑水动床整体模型的比尺设计及模型沙选择[J]. *泥沙研究*, 1998(2):17-25.
- [11] 高建恩,杨世伟,吴普特,等. 水力侵蚀调控物理模拟试验相似律的初步确定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1):27-31.
- [12] 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.
- [13] 李书钦,高建恩,邵辉,等. 选沙对水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3):6-10.
- [14] 李书钦,高建恩,赵春红,等. 坡面水力侵蚀比尺模拟试验设计与验证[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(1):6-12.
- [15] 张元星. 流域水沙变化对水土保持梯田措施的响应研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [16] 李慧娟. 延安极端降雨成因分析及非常规比尺模拟试验研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2017.
- [17] 吴新生. 河工模型量测与控制技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [18] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2014.