

水力侵蚀调控物理模拟试验相似律的初步确定

高建恩, 杨世伟, 吴普特, 王广周, 舒若杰

(中国科学院水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 针对目前水力侵蚀调控模拟试验相似律研究中存在的问题, 利用流体动力学及相似论的基本原理, 探讨了黄土高原小流域水力侵蚀特点, 确定了水力侵蚀模拟相似遵循的基本相似准则和比尺关系。分析及验证结果表明, 黄土高原小流域沟道暴雨侵蚀水力输沙运动多数情况仍可视作紊流运动, 遵循紊动水流输沙方程; 侵蚀模拟试验不但需要满足几何相似、同时必须满足运动相似和动力相似; 小流域水力侵蚀模拟应满足的基本比尺关系为几何相似、降雨相似、水流运动相似, 侵蚀产沙运动相似、床面变形相似及土壤水运动相似等。

关键词: 相似律; 水力侵蚀; 相似比尺; 模拟试验

中图分类号: S274.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)01-0027-05

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.

Gao Jian'en, Yang Shiwei, Wu Pute, et al. Preliminary study on similitude law in simulative experiment for controlling hydraulic erosion[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 27-31. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近20年来, 由于黄土高原小流域农业工程实践的需要, 水力侵蚀模拟重新得到重视^[1,4,14]。事实上, 由于相似论的建立, 使得在不能对复杂的侵蚀流体动力学问题进行理论求解时, 进行三维模拟成为可能。相似论的核心是因次分析法即白金汉(Buckingham J.)的 π 定理^[2,3]。包括 π 定理在内的因次分析法, 是建立在一般物理概念基础之上的数学分析方法。要想正确使用量纲分析研究具体物理现象而取得较好的成果, 还必须对具体物理现象进行理论及实验研究。

长期以来, 与其它行业相比, 相似论及水力模拟试验在农业工程特别是小流域水土资源开发中的应用处在较低的水平。在国外, 从Mamisao^[5]在研究农业流域土地利用影响时, 提出了模拟流域特性实验的动力相似问题, 经过周文德^[6]、Chery^[7]等发展, 1965年Grace和Eagleson^[8]较深入分析了室内模拟试验在动力相似上的要求, 给出重力、粘滞力、表面张力等无因次参数。但由于理论上的准备不足, 无法准确选择合适的模型比尺, 无法使天然水力侵蚀过程在试验中重复出现^[5-8]。国内部分研究则认为, 水力侵蚀不能进行室内模拟^[9,10]。此后, 对模拟准则及比尺进行了若干研究, 但至今未能取得突破^[9-14]。究其原因, 一方面与对水力侵蚀机理有待进一步认识, 同时, 在使用相似论时, 忽略水力侵蚀动力学方程中各种力作用机制的深入研究, 过分夸

大某些力的影响因素有关^[11]。

由于水力侵蚀相似准则研究长期无法突破, 因此目前研究还主要基于所谓的“水文响应相似^[14]”, 即只考虑几何相似, 或者适当考虑重力相似, 对特定模型的水力侵蚀输沙研究首先假定“现象相似”, 不考虑将模型结果定量推广到原型。这种方法在研究初期具有一定意义, 但却达不到室内模型模拟研究定量推广到原型的要求。

黄土高原小流域地表径流模拟机理复杂, 涉及降雨、侵蚀产沙、汇流输沙等, 要进行黄土高原小流域水力调控模拟试验, 必须要对其产汇流特点有所认识, 以便在模型的比尺设计上, 抓住主要矛盾来分析问题。

1 黄土高原小流域降雨侵蚀的特点

所谓小流域是指面积不是太大, 土壤侵蚀自成系统, 生态经济系统便于农村调控的流域^[15]。由于黄土丘陵沟壑区的小流域主要覆盖具“点棱接触支架式多空结构”的多柱状马兰季黄土^[16], 土质疏松、降雨径流的强烈水力侵蚀作用, 使得地表被切割成许多沟壑纵横、丘陵起伏、面积不大于100 km²的小流域, 沟壑密度高达3~4 km/km²。图1为延安燕沟康家圪崂小流域的横剖面, 其侵蚀地貌形态一般以崩边界为界, 崩边界以上为沟间地, 以下为沟谷地。沟间地一般为耕地, 坡度平缓, 约为10~35°。沟谷地包括沟坡区及沟床等。沟坡区地形复杂、坡面破碎, 有坡面大于60°的悬崖, 有40~60°的荒坡, 也有少量25~35°的耕地。其坡陡沟深遇水易融是造成暴雨紊流侵蚀的重要原因。

降雨以后, 雨滴以很大的能量冲击地表, 使土团分散, 土粒溅到空中, 并使地表薄层水流产生强烈紊动, 增加了水流的挟沙能力, 形成溅蚀和片蚀。薄层水流沿坡面运动汇集成股流, 将坡面冲刷成细沟, 若干细沟袭夺兼并, 汇集足够水量, 产生强烈冲刷力形成浅沟; 细沟和浅沟水流进一步汇集, 产生强烈的下切作用, 形成切沟;

收稿日期: 2005-03-29 修订日期: 2005-06-30

基金项目: 国家863计划重大专项(2002AA2Z4051); 科技部农业科技成果转化资金(02EFN217101279); 西部开发科技行动(2002BA901A26); 中科院水保所知识创新领域前沿项目(C23013700)

作者简介: 高建恩(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事节水工程研究。陕西杨凌西农路26号 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: gaojianen@126.com

切沟进一步发育,形成冲沟。在接纳多条冲沟水流之后,形成坳沟进而发展成属于古老沟谷类的河沟,从而完成黄土高原小流域的沟道汇流过程。由于暴雨击溅和沟坡陡峻等因素,致使水流紊动强烈,侵蚀沟坡水流挟沙能力较大,因而水流多为紊流^[17]。

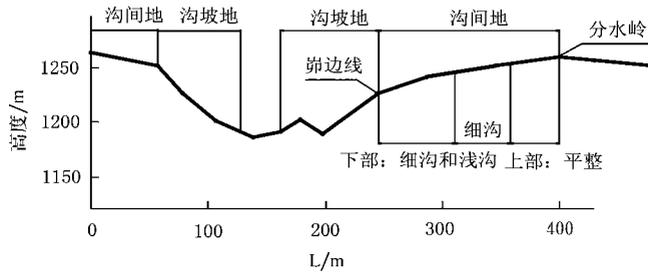


图1 康家圪崂小流域横断面图

Fig. 1 Cross section of Kangjia small watershed

2 黄土高原小流域降雨径流模拟相似的特征

相似这一概念,最早是伴随几何形态的相似而产生的。如平面几何中的相似三角形,立体几何中的相似锥体,建筑物的模型等。一般说来,这种相似仅限于静态的几何相似,属性比较简单,也比较容易做到。这里所讲的相似,是指物质系统的机械运动相似,除要求静态相似外,还要求动态相似;除要求形式相似外,还要求内容相似。因此,属性比较复杂,也比较难以做到。

在论述黄土高原地表径流相似现象的属性时,首先从各个不同侧面阐明相似现象的相似特征。

小流域地表径流模拟实验所研究的物理现象属于机械运动的范畴,因此和原型相似的模型,必然满足几何相似、运动相似和动力相似^[1-3]。几何相似要求模型与原型的几何形态相似:即模型与原型中的任何相应的线性长度,必然具有同一比例;运动相似要求模型与原型的运动状态相似。模型与原型中任何相应点的速度、加速度等必然相互平行且具有同一比例;动力相似要求模型与原型的作用力相似。模型与原型中作用于任何相应点的力必然相互平行且具有同一比例。

相似现象的上述三个方面相似是一个统一的整体,是不可分割的。从实用观点来看,几何相似中长度比尺 λ 是设计模型的重要参数;动力相似的流速比尺 λ_v ,是检验模型相似性和根据模型试验结果推算原型的重要依据;动力相似则是模型设计的主要出发点,三者不可偏废。从理论观点来看,这三个方面刚好完整地表征包括三个基本因次(长度、时间、力或质量)的三个独立的基本物理量,利用它们不同方次组合的无因次综合体,可以描述或量度流体机械运动所遇到的任何物理量,同样利用表征这三个方面相似的比尺可以组合成如下将要阐明的降雨径流运动的任何比尺关系式,因而三者不可偏废。除以上这三个相似特征之外,其它的相似特征,如能量或动量相似特征,都可以通过这三个相似特征表征出来。

3 黄土高原小流域水力侵蚀模拟相似的比尺确定

3.1 降雨及坡面水流运动相似

小流域降雨坡面汇流方程可用如下形式的圣维南方程组描写^[1]:

$$\frac{\partial(Vy)}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = i(x, t) - f(x, t) = r(x, t) \quad (1)$$

$$J_0 - J_F = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{gy} [i(x, t) - io(x, t)] \quad (2)$$

式中 x ——水流方向; y ——坡面流水深; V ——坡面流速; $i(x, t)$ ——降雨强度; $f(x, t)$ ——下渗强度; r ——净雨强度, $r(x, t) = i(x, t) - io(x, t)$, 均为 x, t 的函数, 采用国际标准单位时为 m/s ; J_0 ——坡面坡度; J_F ——摩阻坡度; g ——重力加速度。

对于正态模型, 如果假设几何相似得到保证, 即

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda = \frac{l_y}{l_m} \quad (3)$$

式中 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ ——分别为 x, y, z 三个方向的几何比尺; l_y ——原型线段长度; l_m ——模型线段长度; λ ——线段比例系数(以下不同物理量角标示意类同)。

将这一方程用于原型, 并将原型的有关物理量用比尺转化成相应的模型物理量, 即取

$$x_y = \lambda x_m, y_y = \lambda y_m, z_y = \lambda z_m, V_y = \lambda V_m,$$

对(1)式进行相似变换并整理得

$$\frac{\lambda_v \lambda}{\lambda} \left[\frac{\partial(Vy)}{\partial x} \right]_m + \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)_m = \frac{\lambda}{\lambda} \lambda i(x, t) - \frac{\lambda}{\lambda} \lambda f(x,$$

$$t)_m = \frac{\lambda_v}{\lambda} \lambda r(x, t)_m$$

根据相似第一定理, 相似的物理现象应当被相同的物理方程所描述, 即应有:

$$\frac{\lambda \lambda_v}{\lambda} = \frac{\lambda \lambda_t}{\lambda} = \frac{\lambda \lambda_f}{\lambda} = \frac{\lambda \lambda}{\lambda} = 1 \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \frac{\lambda}{\lambda} \quad (5)$$

即对于小流域来讲, 为满足降雨径流调控需要, 流速、降雨强度、入渗强度及净雨强度服从同一比尺。

同理对(2)式进行变换有一般的阻力比尺:

$$\lambda_{J_F} = 1 \quad (6)$$

即正态模型坡面流阻力比尺等于1。

上述比尺关系虽由一维降雨径流运动方程所得, 但由二维及三维运动方程^[19]也可得出上述结果。

3.2 沟道水流运动

在黄土高原, 小流域土壤侵蚀发育, 每遇暴雨, 水沙俱下。暴雨为产流产沙的主要原因之一。在坡面及沟道汇流过程中, 紊流得到充分发展。与坡面降雨径流相类似, 对三度紊动水流的时均微分方程式即雷诺方程^[1, 18]进行与前类似的相似变换, 可得比尺关系及相似准则^[2-3]:

$$\frac{\lambda_v \lambda}{\lambda} = 1 \text{ 或 } \frac{t u}{l} = \text{const} \quad (7)$$

$$\frac{\lambda_v^2}{\lambda_g \lambda} = 1 \text{ 或 } Fr = \frac{u^2}{gl} = const \quad (8)$$

$$\frac{\lambda_p}{\lambda \lambda_v^2} = 1 \text{ 或 } Eu = \frac{p}{\rho u^2} = const \quad (9)$$

$$\frac{\lambda_v \lambda}{\lambda} = 1 \text{ 或 } Re = \frac{ul}{\nu} = const \quad (10)$$

$$\frac{\lambda_u^2}{\lambda_v^2} = 1 \text{ 或 } \frac{u^2}{\nu^2} = const \quad (11)$$

比尺关系式(7)实质上反映了水流连续条件相似的要求,与降雨径流比尺关系(5)相比,不增加另外的比尺。比尺关系(9)表示原型与模型压力之比等于惯性力之比,相应的相似准则即所谓的欧拉数,因此,这个相似律又称为欧拉相似律。它于弗汝德相似律存在内在联系,可以相互转化,不构成独立的新比尺。

比尺关系式(8)表示原型与模型惯性力之比等于重力之比,相应的相似准则即所谓的弗汝德数,因此这个相似律又称为弗汝德数相似律。由于惯性力重力都是决定小流域地表径流运动很重要的力,这个相似律就是小流域水力模型中重要的相似律。

比尺关系(10)表示原型与模型惯性力之比等于粘滞力之比,相应的相应准则即所谓雷诺数,因此,这个相似数又称为雷诺相似律。由于沟道水流一般均为紊流,而紊流中粘滞力的作用比较小,这个相似律在模型中一般并不要求严格满足,而事实上也无法严格满足。联解这两个关系式,消去 λ_v ,可得

$$\lambda = \frac{\lambda_v^{2/3}}{\lambda_g^{1/3}} \quad (12)$$

由上式甚易看出, $\lambda = 1$ 。也就是说,模型的大小必须和原型一样才能相似^[9,10],这就完全失去了做模型的意义。

比尺关系式(11)表示原型与模型由时均流速产生的惯性力之比,等于由脉动流速产生的惯性力之比;因此也可看成时均流速的平方之比等于脉动流速的脉动矩之比。因此,这个相似律又可以称为紊动相似律。这是问题的一方面。问题的另一方面,脉动惯性力就是所谓的紊动剪力,它和粘滞剪力一样,对水流运动起着阻力作用。因此这个比尺关系式也可以表示惯性力之比等于紊动阻力之比,当粘滞力可以忽略不计时,就是惯性力之比等于阻力之比。当然从一般性的水流运动方程式是导不出阻力相似的比尺关系式的。与正象解微分方程式必须有确定的边界条件一样,和边界条件密切相关的阻力相似的比尺关系式,只能是在每一个具体情况下,由微分方程式的边界条件导出。事实上,坡面沟道水流床面边界条件为,当 $y = 0$ 时,

$$\tau = \tau_0 = \frac{f}{4} \rho \frac{U^2}{2} \quad (13)$$

式中 τ ——床面紊动剪力; f ——床面阻力系数; U ——垂线平均流速,由此可导出比尺关系式

$$\lambda_\tau = \lambda_{\tau_0} = \lambda_f \lambda \lambda_u^2 \quad (14)$$

而三度水流当 x 轴与水流方向一致时,在 xz 平面上沿水流方向的单位面积的紊动剪力应为

$$\tau_{xz} = -\rho u v \quad (15)$$

写成比尺关系式应为

$$\lambda_\tau = \lambda_{\tau_{xz}} = \lambda \lambda_u^2 \quad (16)$$

其实,不但上述特定紊动剪力的比尺关系如此,对于正态模型来说,由于 $\lambda_u = \lambda_v = \lambda_w$,任何平面上沿任何方向上的单位面积的紊动剪力的比尺关系式都是如此。考虑到(14)(16)存在的比尺关系,并取垂线平均流速比尺 $\lambda_w = \lambda_u$,可得

$$\lambda_w^2 = \lambda_f \lambda_u^2 \quad (17)$$

代入(11)即得

$$\frac{\lambda_w^2}{\lambda_f \lambda_u^2} = \frac{1}{\lambda_f} = 1 \text{ 或 } \lambda_f = 1 \quad (18)$$

也就是说,要满足紊动相似或惯性力阻力比相似,正态模型阻力系数的比尺 λ_f 必须等于 1,式(6)与(18)比较不增加新的比尺。由于天然糙率系数 n 的资料比较丰富,为衡量阻力相似,可通过阻力公式

$$U = \frac{8g}{f} \overline{RJ} \quad (19)$$

$$U = \frac{R^{1/6}}{n} \overline{RJ} \quad (20)$$

通过比尺变换联解(18)容易得

$$\lambda_n = \lambda^{1/6} \quad (21)$$

上述水流连续相似(7)、惯性力重力比相似(8)及惯性力阻力比相似(18)或(21)即为正态小流域地表径流沟道水流相似所遵循的比尺表达式。

3.3 侵蚀输沙运动

1) 悬移相似

如前分析,黄土高原小流域侵蚀输沙,悬移质一般情况下占主体,对于正态模型,对悬移质运动的三度扩散方程进行比尺变化有^[11]:

$$\frac{\lambda \lambda_\omega}{\lambda} = 1 \quad (22)$$

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_\omega} = 1 \quad (23)$$

$$\frac{\lambda_{\epsilon_{xz}}}{\lambda \lambda_u} = \frac{\lambda_{\epsilon_y}}{\lambda \lambda_\omega} = \frac{\lambda_{\epsilon_z}}{\lambda \lambda_\omega} = \frac{\lambda_\epsilon}{\lambda \lambda_\omega} = 1 \quad (24)$$

(22)式表示含沙量因时变化与由重力沉降引起的进出沙量变化比相等,在满足(23)条件下,它于(7)式一致,因而不增加新的比尺关系式。(23)式表示由时均流速及重力沉降引起的进出沙量变化比相等,一般称时均流速悬移及重力沉降比相似。(24)式表示由紊动扩散及重力沉降引起的进出沙量变化比相等。泥沙紊动扩散系数 ϵ 按照一般作法可取其与水流的紊动动量扩散系数相等。但由于三度水流的紊动动量扩散系数的表达式不是很清楚,使得进一步展开(24)式从而找到便于控制的比尺关系遭遇到困难。对于二维均匀流来说,它的表达式可从卡尔曼-勃兰德流分布公式导出如下:

$$\epsilon_s = \kappa u_* \left(1 - \frac{y}{h}\right) y \quad (25)$$

因而

$$\lambda_{\epsilon_s} = \lambda_{\epsilon} = \lambda_{\omega} \lambda_{s_0} \lambda_v$$

取 $\lambda_v = 1$, 将所得结果代入(24)中, 即得

$$\frac{\lambda_{s_0}}{\lambda_v} = 1 \quad (26)$$

上面的论述清楚阐明了(23)(24)的物理意义。显然, 要保证泥沙的悬浮相似, 由时均流速、紊动扩散、重力沉降引起的进出单位水体的沙量变化必须各个相等, 亦即(23)(24)应同时满足。对于正态模型来说, 在满足惯性力、阻力、重力比相似条件下,

$$\lambda_v = \lambda_{s_0} = \lambda^{1/2} \quad (27)$$

即(23)(24)将统一成一个比尺关系。因此对于正态模型, 悬移相似应该满足的相似条件为:

$$\lambda_v = \lambda_{s_0} = \lambda_{\omega} = \lambda^{1/2} \quad (28)$$

2) 起动相似

黄土高原小流域暴雨径流侵蚀产沙强烈, 因此, 床面补给条件也应相似, 即要求原型暴雨径流超过下垫面土壤起动流速, 有可能从床面得到泥沙补给时, 模型流速也超过床沙起动流速, 同样有可能从床面得到泥沙补给。起动相似条件要求起动流速比尺 λ_{v_c} 与流速比尺 λ_v 相等, 即

$$\lambda_{v_c} = \lambda_v \quad (29)$$

3) 挟沙相似

小流域模型悬沙运动相似必须解决的另一个问题是, 进入沟道河段的输沙率模型必须与原型相似, 这就涉及到一个含沙量比尺问题。这个比尺可通过悬移质扩散方程的床面边界条件加以确定。后者可以写为^[14]

$$\epsilon_s \frac{\partial s_b}{\partial y_{y=0}} = -\omega s_b \quad (30)$$

式中 s_b —— 床面饱和含沙量。这就是说, 在床面处, 由于含沙量梯度而引起的泥沙向上扩散量, 等于饱和挟沙情况下, 由于重力作用而引起的泥沙向下沉降量。由于具有一定沉速 ω 的河底饱和含沙量为定值, 故床面的向上扩散量 $\epsilon_s \frac{\partial s_b}{\partial y_{y=0}}$ 亦为定值, 亦即床面的向上扩散量仅与水流条件有关。由这个边界条件可以导出的比尺关系为

$$\frac{\lambda_{\epsilon_s} \lambda_{s_b}}{\lambda_{\omega} \lambda_{s_0} \lambda_{y_0}} = 1 \quad (31)$$

考虑到式(24)

$$\frac{\lambda_{\epsilon_s}}{\lambda_{\omega} \lambda_v} = 1$$

应有

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_{s_0}} = 1$$

亦即含沙量比尺应与水流挟沙能力比尺相等。实际上这两个比尺相等, 也可从挟沙水流的冲、淤平衡条件直观地看出来。显然, 只有这两个比尺相等, 原型处于输沙平衡状态时, 模型也相应处于输沙平衡状态; 原型处于冲、淤状态时, 模型相应处于冲淤状态。

4) 侵蚀变形相似

侵蚀泥沙运动相似中必须解决的另一个问题是, 模型所反映出的下垫面变形应当与原型相似。这一点在许多情况下实际上正是模型试验所达到的目的。这里主要是涉及到一个时间比尺问题。

由床面变形相似

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + Y B \frac{\partial Y}{\partial t} = 0 \quad (33)$$

考虑满足惯性力重力比相似得到冲淤时间比尺为

$$\lambda_t = \frac{\lambda Y}{\lambda_v \lambda} = \frac{\lambda_{y_0}}{\lambda} \lambda \quad (34)$$

式中 λ —— 冲淤变形时间比尺; λ_v —— 泥沙干容重比尺。

从严格满足水流运动和河床冲淤变形相似两方面来讲, 模型设计应该做到水流运动时间比尺 λ_t 和河床冲淤变形时间比尺 λ 相等。一般河工模型中, 特别是模拟高含沙水流运动的模型中, 往往很难做到这一点。在模型试验中通常的做法是采用河床冲淤变形时间比尺为模型的时间比尺, 在保证模型冲淤相似的前提下, 尽量做到两个时间比尺接近, 以减少水流过程变形对模型的影响。而降雨试验寻求的是降雨的当量过程^[1, 19], 恰恰可以容许水流时间比尺可以有较大偏离。由于含沙量比尺由验证试验确定, 相应的时间比尺最终也是由验证试验确定的。

3.4 降雨入渗相似

由土壤水运动基本方程^[11]:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (35)$$

式中 ρ —— 水的密度; V_x, V_y, V_z —— 分别为 x, y, z 方向的平均流速(非水质点的运动速度); θ —— 土壤的含水量。

引入相似变换后, 在满足水流相似后, 容易得 $\lambda_{\theta} = 1$ 即要求模型含水量与原型含水量相等。

3.5 主要比尺关系式与试验验证

基于上述分析, 黄土高原小流域水力侵蚀应遵循的主要比尺为:

几何相似: $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$

降雨相似: $\lambda_t = \lambda_v = \lambda^{1/2}$

水流运动相似: $\lambda_v = \lambda^{1/2}, \lambda_f = 1$ 或 $\lambda_v = \lambda^{1/6}$

侵蚀产沙运动相似: $\lambda_v = \lambda_{v_c} = \lambda_{s_0} = \lambda_{\omega}$

冲淤变形相似: $\lambda_t = \frac{\lambda_{y_0}}{\lambda} \lambda$

土壤水运动相似: $\lambda_{\theta} = 1$

基于上述所得相似比尺, 设计了黄土高原康家屹崂小流域水力侵蚀模型^[20], 验证结果表明, 在正态条件下, 满足几何相似、降雨相似、水力侵蚀产沙、输沙相似及床面变形相似等条件下所建造的黄土高原延安燕沟康家屹崂小流域模型, 采用几何比尺为 100 时, 其降雨、汇流、产沙、输沙是基本符合实际情况的, 可以作为该流域治理水土流失、优化治理方案, 寻求水土资源高效利用措施的工具。

4 结 论

1) 小流域地表径流模型相似必须满足几何、运动相似和动力相似;

2) 基于上述几何相似、降雨相似、水流运动相似、侵蚀泥沙运动相似、土壤水运动相似等组成的相似比尺关系设计的黄土高原小流域模型, 可以作为模拟小流域水力侵蚀调控, 优化治理措施研究的有效方法。

[参 考 文 献]

- [1] 高建恩. 地表径流调控与模拟试验研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2005: 70– 79.
- [2] Левн, И. И. Мдепирование Гдравпических Ялей [M]. 1960: 15– 55.
- [3] Кирпичев М. В. Теория Подбня АНССР [M]. 1953: 6– 18.
- [4] 李昌华, 等. 论动床河工模型试验的相似率[J]. 水利学报, 1966, 4: 1– 10.
- [5] M amisao J P. Development of Agricultural Watershed by Similitude[R]. M. Sc. Thesis, Iowa State College, 1952: 10– 30.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Grace R A, Eaglson P S. Similarity Criteria in the Surface

- Runoff Process [R]. MIT, Hydrodynamic Lab, Technical Report No. 77, 1965: 30– 42.
- [9] 雷阿林, 唐克丽. 土壤侵蚀模型试验中的降雨相似及其实现[J]. 科学通报, 1995, 11: 2004– 2006.
- [10] 雷阿林, 史衍玺, 唐克丽. 土壤侵蚀模型实验中的土壤相似性问题[J]. 科学通报, 1996, 10: 1801– 1804.
- [11] 蒋定生, 周清, 范兴科. 小流域水沙调控正态整体模拟试验[J]. 水土保持学报, 1994, 6: 25– 30.
- [12] E. de St Q. Isaacson, M. de St Q. Isaacson: Dimensional Methods in Engineering and Physics [R]. 1975: 20– 30.
- [13] Yalin M S. Theory of Hydraulic Models [M]. The Macmillan Press Ltd., 1971.
- [14] 沈冰, 李怀恩, 江彩萍. 论水蚀实验的相似性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 9: 94– 96.
- [15] 蔡强国, 王桂平, 陈永宗, 等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟 [M]. 科学出版社, 1998. 4: 2– 10.
- [16] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报, 1991, (11): 1– 8.
- [17] 王兴奎, 钱宁, 胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程[J]. 水利学报, 1982, (7): 26– 35.
- [18] O. Reynolds. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion [M]. Philos. Trans. of the Royal Society, 1895: 37– 52.
- [19] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀力学() – 土壤侵蚀[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 493– 506.
- [20] 高建恩, 吴普特, 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.

Preliminary study on similitude law in simulative experiment for controlling hydraulic erosion

Gao Jian'en, Yang Shiwei, Wu Pute, Wang Guangzhou, Shu Ruojie

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Northwest A & F University, National Engineering Center of Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to solve the problems on similitude law existing in simulative experiment for controlling hydraulic erosion in small watershed of Loess Plateau in China, the authors analyze the characteristics of hydraulic erosion in small watershed of Loess Plateau, give the basic similitude criteria and scale expressions for physically simulative experiment according to principles of hydromechanics and similarity theory. The results indicated that the basic water movement is turbulent flow and follows sediment-transporting equations of turbulent flow. The simulative experiment should obey not only geometric similarity, but also kinematical and dynamic similarity. The basic similarity scale expressions are the ones of the geometric, rainfall, flow, erosion sediment transport, bed deformation and soil water movement similarity etc.

Key words: similitude law; hydraulic erosion; similarity scale; simulative experiment