

# 实验侵蚀学学科构建初探

王文龙 雷阿林

中国科学院 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·陕西杨陵·712100)  
水利部

**摘要** 实验模拟逐渐成为土壤侵蚀学研究的主要手段和不可分割的组成部分,实验侵蚀学也正在成为跨界于侵蚀学与技术科学之间的边缘学科。该文详细地论述了实验侵蚀学的性质、内容、任务及其理论基础,阐述了它在我国的发展概况,探讨了实验侵蚀学今后的发展方向及亟待解决的问题。  
中图分类号: S157.1

**关键词:** 实验侵蚀学 实验与模拟相似性理论 模拟实验装置 测试手段自动化

## Construction and Development of Experimental Erosology

Wang Wenlong Len Alin

(State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling District, Shaanxi Province, 712100, PRC)

**Abstract** Experimental simulation is becoming a chief method and an integrated component of soil erosion study. Meanwhile, the experimental erosology is also becoming a borderline subject between erosology and technology. The nature, contents, task and its theoretical basis are described. The development situation is introduced. And the developing direction together with its accompanying problems are discussed.

**Keywords:** experimental erosology; experiment simulation; similarity theory; simulated rainfall facilities; automation of observation way

## 1 引言

实验和模拟是科学研究必不可少的手段和重要的组成部分。模拟实验可以人为地控制实验条件和参变量;可以简化实验,突出主要矛盾和因子;缩短研究周期及促使人们从物理角度理解现象等,从而越来越受到侵蚀研究者的青睐,并逐渐成为土壤侵蚀研究的重要支撑技术。

随着土壤侵蚀学研究向广度和深度发展,侵蚀学以定量、过程和微观机制分析为特征,已离

收稿日期:1998-07-20

\* 国家自然科学基金(49671052)及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(96Z003)资助项目

不开模拟实验的手段,另一方面,土壤侵蚀学科与生产实践的日益结合,常常需要侵蚀学提供一个定量的数据和结论。为此,实验模拟已逐渐成为土壤侵蚀学研究的重要手段和不可分割的组成部分,使实验侵蚀学逐渐独立并有了很大的发展。

在我国,中科院水保所、中科院地理所、黄河水利委员会、西安理工大学等单位的许多学者多年来运用模拟降雨装置,倾注于土壤侵蚀学动力机制的研究,取得了一些重要成果,曾经倡导和呼吁加强土壤侵蚀模拟实验理论与自动化观测仪器研制,对实验侵蚀学在我国的发展起到了巨大的推动作用。

## 2 实验侵蚀学的性质、内容任务及其理论基础

### 2.1 实验侵蚀学的性质

所谓实验侵蚀学是运用模拟实验装置在精密监测和一定的控制条件下,对被选择的侵蚀对象或地貌特征进行野外实验或模型实验研究的侵蚀学分支。一方面侵蚀实验是侵蚀学研究的有力武器,是一种有效的科学研究工具和手段。侵蚀实验有其自身的理论基础,实验类型、设计方法、操作实施的内涵和外延,有其自身的发生发展过程;另一方面,侵蚀实验又是土壤侵蚀学研究的不可分割的组成部分。侵蚀实验与特定的侵蚀对象即地貌特征密切相关,不同的对象,不同的内容,需采取不同的实验方法和途径。显然,实验侵蚀学是跨界于土壤侵蚀学与实验技术科学之间的边缘科学。

### 2.2 实验侵蚀学的内容和任务

模拟实验的相似理论、和实验模拟方法是实验侵蚀学的两个重要方面,构成了实验侵蚀学的理论、方法和技术手段的支撑。

2.2.1 模型实验的相似理论及地区性外推经验公式的研究 相似原理是土壤侵蚀模型试验的理论基础。不论何种实验,只有与原型在一定程度上相似,方具有研究和应用价值,模拟实验的成果才可能推广到原型中去。模拟的相似性具体体现在与原型的形态、内容及过程行为等方面的可比性、可推性或关联性;或者几何、运动、动力相似或者作用、行为、过程相似;可以是牛顿力学体相似、也可以是非牛顿力学相似。

- (1) 几何相似:要求模拟的尺度参数与原型成比例;
- (2) 运动相似:要求模型与原型的速度场相似;
- (3) 动力相似:要求模型与原型的受力场成几何相似;动力边界和起始条件相同。

土壤侵蚀模拟实验,最基本的相似条件大致有两个,即作为侵蚀动力源泉的降雨相似和作为被侵蚀对象的土壤相似问题,此乃土壤侵蚀相似理论的最关键问题之一。在实际应用中,通常采用1:1的比尺,那么采用什么控制措施使其达到结果相似,是问题的核心。另外,模型比尺选择的原则、理论依据及方法也是需要研究的基本理论之一。

土壤侵蚀模型实验结果与原型之间的关系,也是实验侵蚀学的重要基础之一。只有通过多次的实验建立不同地区、不同下垫面条件下的模型与原型之间的关系,推求不同地区性的外推经验公式,这样在生产实践中将会大大的方便模型成果的外推应用。使土壤侵蚀模型实验的理论更加坚实可靠。

2.2.2 模拟降雨实验装置、各种测验仪器、摄影及图象处理设备的研制与引进 模拟实验装置是土壤侵蚀研究的主要设备,因此各种实验设备的研制和改进也是实验侵蚀学的一个重要方面。人工降雨装置主要是指降雨发生器,是整个降雨装置的关键部件。目前世界各国和我国降雨装置

常用的喷头有喷管喷射式、方侧式、旋转式喷射式、针管滴定式等4种类型。在水土流失研究中,需要模拟天然降雨的最重要特性是雨滴滴谱、雨滴终速度和相应的雨强。目前,主要采用模拟降雨与天然降雨能量相似的方法,因为降雨能量与土壤侵蚀的关系较为密切,此方法已得到大家公认。此外,水沙自动取样装置电子跟踪式自动水位计,电磁流量计,微型测速仪,浊度仪,电阻式地形仪以及高速摄影机,地面遥感观测系统等的研制及其性能改进,也是其重要的研究内容。

2.2.3 实验模拟方法的标准化研究 主要包括选定相似准则,确定模型种类,模型统计与制作(模型布置,几何比尺选定,模型范围的确定),实验方案的拟定以及观测项目及其方法,实验资料整理以及实验成果的分析等。

### 2.3 土壤侵蚀室内实验研究主要内容

为了深入研究土壤侵蚀的内在机理,运用模拟实验的手段与方法,必须进行有目的、单因素或多组合因素的定性定量实验,其主要内容为:(1) 坡沟形态与微地貌发生发展及演变规律;(2) 地面坡度、坡型(凸型、凹型、直线型、复合型及阶梯型)及坡长对水土流失的影响及定量指标;(3) 降雨强度、雨型对水土流失的影响;(4) 土壤抗蚀抗冲性能定性、定量的试验研究;(5) 各种侵蚀方式动力临界指标的筛选,及利用该指标所进行的侵蚀方式的水力学分类;(6) 不同侵蚀方式的流态判定、流速分布、阻力规律及各种水力要素的相互关系,运动方程的表达形式,降雨及坡面糙度的影响等水力学特征;(7) 不同侵蚀方式的产沙规律,泥沙运动方式,泥沙起动、输移特征,挟沙力,降雨扰动对产沙、输沙的作用,化学及生物过程对泥沙运动的影响等产沙、输沙力学特征。(8) 降雨入渗与径流发生及滑坡关系;(9) 土壤侵蚀过程与元素迁移以及土地退化问题的研究;(10) 不同作物、不同耕作方法对水土流失的影响;(11) 几种主要牧草和灌木防止水土流失作用的定量分析试验;(12) 模拟实验方法的标准化及规范制订;(13) 模拟实验结果与原型的对比分析及不同地区外推公式的建立;(14) 模拟降雨设备的改进和径流泥沙测试仪器的研制;(15) 小流域水土流失发生发展过程及产沙来源的研究。

## 3 实验侵蚀学在我国的发展

40年代,Laws和Paissons运用模拟降雨实验,研究了雨滴大小,滴谱分布、雨滴终点速度以及它们与降雨强度的关系,成为进行模拟降雨实验设计的重要依据。之后,Elison通过模拟降雨实验揭示了雨滴是水蚀过程中的重要营力。50年代,苏联的一些学者对侵蚀进行了微观研究,注意了坡面上小侵蚀犁沟的发育特征;研究了流量、原始地面比降,坡面沙子粒度对形成切沟形态和形成速率的影响等。

我国的模拟实验始于50年代仿制苏联的瓦尔达依式的模拟降雨设备。从60年代开始由黄河水利委员会水利科学研究所研制的侧喷式模拟降雨机得到广泛应用。中山大学地理系曾应用小型水槽,进行了人工降雨的尝试。70年代末,中国科学院地理所建成坡地地貌实验室,开展了溅蚀的实验研究,探讨坡度对坡面产流、产沙过程的影响,植被对降雨溅蚀的影响以及表土结皮在溅蚀和坡面侵蚀过程中的作用等。中国科学院、水利部水土保持研究所在人工模拟大厅对雨滴测定方法、降雨雨滴能量、坡面流速、黄土高原不同类型土壤抗冲性能以及黄土地区天然降雨雨滴特性和侵蚀性降雨标准进行了研究,西安理工大学对模拟降雨的相似性也进行了初步探索,取得了可喜成果。通过多年研究,我国的实验侵蚀学在以下方面取得了进展。

### 3.1 原型分类与原型选定

自然环境复杂多样,其不同组合构成不同的原型形态,这些不同的原型又呈现了不同的土壤

侵蚀规律。人们绝不可能仅用一个“万能模型”去再现现实世界多种多样的“原型特征”，也永远不要指望在实验室内重演自然界不胜枚举的原型过程。雷阿林基于野外考察，图上量算及对比分析，探讨了黄土高原丘陵沟壑地区小流域和坡沟形态的相似性与差异性，据此给出了一个简单的模拟实验的原型分类系统，及一些关于原型选定的基本依据与方法，为室内模型制作提供了科学依据。

### 3.2 降雨相似及其实现

运用量纲分析的方法，导出降雨相似性的 2 个相似法则

$$\pi_1 = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho u L}{\mu} \text{ (雷诺数 } R_e)$$

$$\pi_2 = \frac{F_i}{F_g} = \frac{v^2}{gL} \text{ (弗罗德数 } F_r)$$

式中： $F_i$ ——惯性力； $F_g$ ——重力； $F_v$ ——粘滞力； $P$ ——速度； $V$ ——速度； $L$ ——长度； $g$ ——重力加速度； $\mu$ ——粘滞系数。

并得出在土壤侵蚀模型试验中只能对降雨近似复制，即取比例尺为 1 : 1。虽然不够完备，但可以通过工程技术法、理论补偿法及实验验证法等进行偏差纠正，以达到满意的结果。

### 3.3 土壤相似性问题

运用相似理论与侵蚀学原理，解析土壤侵蚀现象的物理过程，导出支配该过程的相似准则进而提出 1 : 1 模拟的相似条件，并指出土壤不宜做缩小比尺的模拟。但问题并没有根本解决，构造类似于原状土壤的模型土是需要进一步研究的课题。基本的认识是，如果原状土的降雨入渗产流产沙过程与扰动土的相应过程趋近一致时，即认为二者有相似的侵蚀过程与特点，后者可代替前者，其结果也可应用外推于前者。在野外条件下，对未扰动的原状土测定其降雨条件下的产流产沙过程及过程的土壤主要参量背景值；继而，在室内条件下，对扰动土采取不同处理，进行降雨实验，并测定入渗与产流产沙过程，从而遴选出扰动土模拟相似的控制指标和装箱程序。

### 3.4 降雨装置性能的改进以及观测设备的研制

自从 60 年代，由黄委会水利科学研究所牟金泽等人研制的侧喷式模拟降雨机得到广泛应用，黑龙江水土保持研究所 PS<sub>3-15</sub> 型模拟降雨机也得到推广，黄委会西峰水保站和西安理工大学研制的模拟变雨强和不同类型降雨过程的移动式模拟降雨装置已见诸报道。另外，中国科学院水土保持研究所，中科院土壤研究所，北京林业大学等单位从国外引进的模拟降雨装置也在土壤侵蚀研究中得到应用。中科院地理所与加拿大多伦多大学（如表 1）合作研制的便携式小型降雨器，经过改进后，可以在野外和室内较为真实地模拟降雨入渗过程，克服了以往所用“入渗环法”不足。西安理工大学在室内实验装置和数据自动化采集方面做了大量工作，先后研制出一维土柱入渗实验装置系统，一维入渗量测计算机数据处理系统，室内坡地降雨入渗及产流实验系统，二维入渗土壤含水量智能测试系统等，使用后效果良好，为测试手段自动化大大地推进了一步。

## 4 实验侵蚀学的发展方向及亟待解决的问题

### 4.1 实验侵蚀学的发展方向

(1) 实验侵蚀学已成为研究土壤侵蚀学的重要手段和不可分割的组成部分。随着作为一门独立科学的土壤侵蚀学的发展，随着它与生产实践联系的日益加强，侵蚀学的研究重心势必会移到实验方法上来，从而提供定量解决和精确预报问题的可能性。这种变化，是任何一门逐

渐发展学科的必然现象。所以必须充分认识到侵蚀实验的必要性和重要性,实验假设和预测未来是必不可少的。应用侵蚀实验方面的实验研究会越来越受到重视。

(2) 在实验内容上,由单因素实验向多因素综合实验发展,由侵蚀系统中单一侵蚀过程向侵蚀完整系统的实验发展。多因素实验的耦合叠加及响应过程研究,进行定量描述是实验与模拟的必由之路。有利于人们运用动力学的观点探讨土壤侵蚀的机理,提高土壤侵蚀学科的理论水平。

表1 土壤侵蚀模拟降雨实验设备

实验室,站名	所建单位	建立年份	主要设备
坡地地貌实验室	中国科学院地理研究所	1979	室内大型模拟降雨装置便携式小型降雨器
土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室	中国科学院水利部水土保持研究所	1975	人工模拟降雨实验大厅
	黑龙江水土保持研究所		PS <sub>3</sub> -15型移动式模拟降雨机
泥河沟观测站	黄委会西峰水土保持试验站	1984	野外大型移动式人工模拟降雨装置
离石水保试验站	山西省水土保持研究所		
水文水资源实验室	西安理工大学	1985	人工模拟降雨大厅
土壤侵蚀实验室	北京林业大学水土保持学院	1989	
土壤物理研究室	中国科学院南京土壤研究所	1986	
泥沙研究室	黄委会水利科学研究所	1962	侧喷式人工降雨机
风洞实验室	中国科学院兰州沙漠所	1965	风沙环境风洞实验装置
泥石流动力实验室	中国科学院成都山地灾害与环境研究所	1987	小型泥石流试验装置
滑坡模拟实验室	中国科学院成都山地灾害与环境研究所	1981	滑坡模拟实验装置

## 4.2 实验侵蚀学亟待解决的问题

**4.2.1 实验观测的规范化与标准化** 尽管土壤侵蚀模拟实验的内容可以千差万别,但基本的观测项目是大同小异的。应该制定各个观测项目(如气象、水文、土壤、地形等要素的观测和不同侵蚀类型,如溅蚀、面蚀、沟蚀、重力侵蚀、土壤蠕动等的观测)的规范,实现标准化,才能为不同站点之间数据的对比提供科学的基础。

**4.2.2 观测手段与数据采集的自动化** 目前,我国的土壤侵蚀实验尚以手工操作为主,数据自动采集与处理尚不普遍,因而工作效率低、误差大,不能准确、同步地反映某一侵蚀过程中物质(水、沙、溶解质、营养元素)迁移或形态变化的历时过程,有时会漏测某些重要的特征(如峰值)。因此,观测手段与数据处理的现代化,是摆在我们面前的一项迫切的任务。

**4.2.3 新技术的应用** 目前国外土壤侵蚀模型实验中广泛运用的各种示踪技术、信息系统技术以及高精度、快速的分析技术,在国内尚未得到普及,亟待加强,为赶超世界先进水平提供技术上的保证。

该文得到唐克丽研究员,李靖教授,周佩华,蒋定生,李占斌研究员的指导,在此谨表谢意。

## 参 考 文 献

- 1 H,N 马卡维耶夫,等. 实验地貌学. 北京: 科学出版社,1996.
- 2 雷阿林,唐克丽. 土壤侵蚀模拟试验中的降雨相似及其实现. 科学通报,1995,40(21):2004—2006.
- 3 雷阿林,唐克丽,史衍玺,等. 土壤侵蚀模型试验中的土壤相似性问题. 科学通报,1996,41(19):1801—1804.
- 4 金德生,倪晋仁. 实验地貌学研究进展. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 3—16.
- 5 金德生. 流水地貌新进展. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 42—51.
- 6 许炯心. 论流水地貌野外实验研究. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 52—58.
- 7 胡平华,游勇. 泥石流的观测与实验研究. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 59—66.
- 8 陈浩. 坡地水沙运移特征的实验研究. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 102—111.
- 9 金德生,郭庆伍. 流水地貌实验模型的相似性问题. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 265—268.
- 10 陈浩. 关于人工降雨模拟试验的相似性问题. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 274—279.
- 11 胡平华,游勇. 泥石流实验研究方法及其应用. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 289—294.
- 12 蔡强国,马绍嘉,吴游,等. 研究入渗、径流、与土壤侵蚀流沙过程的模拟降雨实验装置. 见:金德生,地貌实验与模拟. 北京:地震出版社,1995. 295—303.
- 13 徐挺,编著. 相似理论与模型实验. 北京:中国农业机械出版社,1982.
- 14 [美]R. 拉尔主编. 土壤侵蚀研究方法. 北京:科学出版社,1991.
- 15 刘贤万,等著. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京:科学出版社,1995.
- 16 雷阿林,王文龙,唐克丽,等. 土壤侵蚀模型试验若干问题. 水土保持研究,1998,5(2):127—130.
- 17 中国科学院西北水土保持研究所. 土壤侵蚀模型试验可行性研究报告(内部资料). 水保所资料室.
- 18 蒋定生,周清,等. 小流域水沙调控生态整体模型模拟实验. 水土保持学报,1994,8(2):25—30.
- 19 Ellison W D. Studies of Raindrop Erosion. Anrineering 25,1944,131—136.
- 20 Laws J O,Parsons D A. The Relationship of Raindrop Size to Intensity,Trans. Am. Geophy. Union 1943, 24:452—459.
- 21 Bryan R B,(ed). Soil Erosion,Experinents and Models,OATENA supplement 17. 1990.
- 22 Meyer L D. Simulation of Rainfall for Soil Erosion Research,Transaction of ASAE,1965 Vol. 8.
- 23 Lal R,(ed. ). Soil Erosion Research Methods. The Soil Erosion and Water Conservation Society,1988.
- 24 Luk S H, Abrahans A D, Parsons A J. A Simple Rainfall Simulator and Field System for Hdrogeomor Physical Experiments,Physical Geography,1986,Vol. 7,No. 4
- 25 Morgan R P C. Field Studies of Rainsplash Erosion,Earth Surface Processes,1978,vol. 3:295—299.
- 26 Meyer L D,Wischmeier W H. Mathemairical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water,Trans. ASAE. 1969,12(6).
- 27 Foster G R,et al. An Erosion Eguation Derived from basic Erosion Principles,Trans. ASAE,1977,20(4)
- 28 Foster,G. R. Modeling the Soil Erosion Process,In Hydrologic Modeling of Small Watersheds American Society of Agricultrual Enginerrrs. 1982. 297—382.