

文章编号: 1007-6301 (1999) 02-0103-08

坡面动力侵蚀过程的实验研究进展

胡世雄, 靳长兴

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

摘要: 本文首先总结了坡面流及坡面动力侵蚀过程的实验设备、技术手段及实验内容方面的进展, 然后全面探讨了坡面侵蚀实验方面的国内外研究最新进展, 最后作者分析了实验研究方面存在的问题, 并提出了前景展望。

关 键 词: 坡面流; 坡面侵蚀; 实验小区; 室内实验

中图分类号: P931.92 **文献标识码:** A

1 实验设备技术手段及实验内容方面的进展

1.1 人工模拟降雨实验设备技术手段

坡面流及坡面动力侵蚀过程实验研究, 除一些定点观测站观测记录自然降雨外, 室内外实验多采用人工模拟降雨方式进行。使用人工模拟降雨装置有两个主要优点: 试验结果不再因等候适当的雨型而大大加快了研究进程; 同时研究效率也因控制了一个最重要的变量而提高, 无须内插或外推去获得资料^[1]。

国外本世纪 30 年代开始使用人工降雨器^[2]。初期因对雨滴打击认识不足, 设计的人工降雨装置多从降雨总量来模拟天然雨, 尽管有一定成效, 但其降雨与天然降雨的特征显著不符, 且只用于小面积研究。1950 年前后, 在揭示侵蚀与动能关系的基础上, 从能量入手, 使模拟降雨装置研究进入新的阶段, 如 L. D. Meyer 和 D. L. McCune 设计的径流小区人工降雨装置, 运用自动控制, 是目前比较好的人工降雨装置, 其缺陷是造价较高; 苏联的 B. M. 撒哈洛夫、A. M. 布雷京等也进一步设计了新的降雨装置, 如莲蓬头式和瓦尔达依式人工降雨装置, 但其雨滴均匀性比较差; 以色列的 A. Shachri 及 I. Singer 还设计了双臂旋转型喷头, 其喷洒面积大, 但雨滴与雨强成反比, 与天然降雨不同。六、七十年代以来, 降雨模拟装置由无压力滴水器发展为喷射模拟装置, 如 Meyer 在百渡大学发明的降雨机, 首次按动能设计, 引入大型试验小区; Swanson 设计的旋转式转桁式人工降雨机, 可用于试验小区 (5 × 25 m); Betrand 等介绍的百渡喷射渗透仪属小型装置, 便于实验室及小型试验小区研究。Morin 等创造了用盾形金属盘间断地将喷射隔断, 以模拟连续性降雨, 效果很好。目

收稿日期: 1998-10; 修订日期: 1999-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49501002); 国家基金委与水利部联合资助项目 (59890200)

作者简介: 胡世雄 (1968-), 男, 1998 年在中国科学院地理研究所获自然地理学博士学位, 现在水利部国际泥沙研究培训中心从事博士后研究工作。主要研究方向为坡地侵蚀过程、环境演变、泥沙灾害防治等, 发表论文 10 余篇。E-mail: sxhu@iwhr.com

前,美、欧、日等国际保留少数测定天然降雨的小区外,几乎所有的水土流失资料均来自人工降雨试验。人工降雨设施的应用从室内扩大到野外,测验手段采用遥感、电子计算机等新技术和自动化仪器。总之,人工降雨模拟装置已成为水保科研中不可缺少的工具之一。

我国是在 60 年代初期^[3],首先由淮委水文测验室的实验站及黄委会子洲径流站开始采用蓬蓬头式和瓦尔达依式人工降雨器做水土流失规律研究工作,十年动乱被迫搁置。80 年代初,有关水保、水利、地理等科研机构又陆续开展了这种研究。目前国内主要模拟降雨装置有^[4~7]:西北水保所国家重点实验室人工降雨模拟装置、中科院地理所坡地实验室旋转模拟降雨试验装置、北京水利科学研究院水文研究所、黄委会西峰水保站野外大型活动式人工模拟降雨装置、西安理工大学水资源研究所人工模拟降雨实验装置,此外,河海大学、铁道部西南研究所及一些地方水保站或水保所也有不同功能的模拟降雨装置。

从模拟降雨设备使用的整个情况看,70 年代以前,国内虽已重视人工降雨机具及方法的实验研究,但真正用于水保研究的不多,尤其野外试验少。80 年代以来,伴随着对水保的重视和中外合作研究的增加,各地选用或研制不同形式的人工降雨装置,进行野外或室内降雨试验,大大加快了水土流失规律研究的步伐。赵志进、李桂英^[8]、蔡强国、陆兆熊等^[4,9]等比较系统地介绍了国内外人工模拟降雨机具和方法的产生与应用过程,并对设备技术的改进提出了有益的设想与展望。

目前人工模拟降雨装置发展方向为:高度自动化、大型化(适宜全坡面降雨实验)、小型化(便于野外携带)。我国降雨机具方面与国外差距较大,主要是设备自动化控制、喷头等零部件设计制作技术等方面较为落后。

1.2 主要实验内容

自从 1895 年 Wallay 在德国首先开展坡面冲刷过程的野外实验研究以来,不同学科的学者进行了数以千计的试验。这些学科主要有土壤保持、农业工程、水力工程、水文学、林学和地貌学。可按方法或目的将这些试验分为下面几类:① 研究土壤侵蚀过程和主要影响因素的径流小区试验;② 验证种植、耕作土壤保持措施效果的径流小区试验;③ 集中观测水文过程,尤其是入渗、侧向亚表层流及径流产生方式的径流小区或山坡试验;④ 确定不同地表径流入渗、沉积搬运的降水阈值的径流小区或小流域实验,这是流域水沙平衡研究的一个部分;⑤ 确定剥蚀速率的试验,这是山坡发育演化研究的一部分;⑥ 研究坡面冲刷过程的试验;⑦ 集中研究坡面冲刷的水力特征及其与细沟、沟道(河道)产生的关系的径流小区或流域实验;⑧ 流域河网演化及地形几何学的试验研究。有的试验包括上述不止一种类型的目的^[10]。

目前在坡面过程及土壤侵蚀研究的实验内容主要包括溅蚀、雨滴组成与终速、结皮形成、细沟侵蚀过程、面蚀、沟蚀及土壤侵蚀产流产沙,以及各种水土保持措施的效益估算等方面,最终为进一步搞清坡面流及坡面动力侵蚀过程的演变机理,建立新一代土壤侵蚀模型,治理水土流失,建立现代化农业及持续农业提供条件。

2 野外试验小区

径流小区实验研究,是指在坡面上通过隔离地块的径流、泥沙等的测定,研究不同影响条件下的产流产沙机理、坡面发育过程及水保措施等对产流产沙的影响作用,属微观研

究手段。1917 年美国密布苏里大学土壤系主任 Miller M F 教授创设了第一批试验小区, 由此开始了因子量化的首次综合性工作, 并在全美不同类型区建立了 10 个土壤侵蚀实验场^[2]。1954 年在百渡 (Purdue) 大学建立了数据处理中心。此后, 它作为一种基本研究手段被广泛应用。目前试验小区分为三类: ① 微型小区: 面积 $1 \sim 2 \text{ m}^2$, 用于建立不同简单处理 (有无覆盖) 径流和侵蚀差异研究; ② 一般小区: 适于做各种农业及轮作、林牧试验及效益测定, 美国: $6\text{ft} \times 72.6\text{ft}$, 约 $2 \times 22 \text{ m}$; 中国: $5 \times 20 \text{ m}$ 。③ 大型小区: 又称自然小集流区, 包括从分水岭起直至沟坡脚的全坡长侵蚀小区, 或从岸边一直至沟坡脚的谷坡侵蚀小区, 这种包括细沟、浅沟的小集水区域或大型径流场, 其大小可达几百米至几公顷。

近年来, 国内外采用室外试验小区进行了大量的坡面流和坡面动力侵蚀过程研究, 下面分国外及国内两部分进行总结。

2.1 国外研究进展

2.1.1 径流小区和土地利用管理的坡面冲刷实验方面

USSCS (美国土壤保持局) 首先进行了大量的径流小区试验 (长 $22.1 \text{ m} \times$ 宽 1.85 m , 标准矩形, 缓坡农田坡度约为 5°), 其资料经归纳得到 USEL 及 MUSEL (Smith and Wischmeier, 1965, 1978), 这些试验由于属经验性, 与物理过程联系较少而推广受到极大限制。与此同时, 非洲热带地区也进行了一些重要工作 (van Rensburg, 1955, Hudson 1957), 并得出一个不同的土壤侵蚀预报模型^[2]。七、八十年代以来, 国外学者为建立各种各样的坡面侵蚀预报模型^[11] (如 ANSWERS、CREAMS、EPIC 等) 进行了许多径流小区的坡面冲刷实验, 尤其八十年代中后期以来, 美国农业部等机构投入大量人力物力, 通过径流小区及土地利用管理的坡面冲刷实验, 详细探讨坡面流及坡地动力侵蚀过程的物理机制, 最终建立了基于物理基础之上的 WEPP 模型^[12]。现将这方面主要研究内容及成果归纳如下表 1^[10, 12, 13 ~ 16]。

2.1.2 微形实验小区和微形流域的坡面冲刷实验方面

对坡面冲刷过程的早期研究由一些地貌学和水文学家来进行^[10], Schumm (1956), Young (1958)、Schumm and Lusby (1963)、Evenari et al (1968), 但 Emmett (1970) 关于坡面流水力特性的研究最引人注目。这个研究是一些水力工程师如 Izzard (1944, 1946)、Parsons (1949)、Iwagaki (1955) 对薄层坡面流水力学实验研究的继续。Emmett 的实验为其后的实验研究提供了概念框架, 随后许多学者进行了的深入研究, 将主要成果归纳如表 2^[10, 17]。

综上所述, 微形小区及小流域实验研究是坡面冲刷过程研究的一种重要方法, 其重点包括对入渗, 山坡水文的观测, 坡面冲刷水文特征的分析 and 从河流地貌中派生的各种水力关系的应用。研究者越来越注意到, 坡面冲刷过程及其对地形演化的作用主要受土壤易蚀性及土壤其它特性的影响, 这主要包括: 土壤初始结构变化及团聚体性质; 选择性侵蚀引起的时空变化; 土壤含水量变化引起可蚀性随时间的变化; 雨滴击溅及其它过程引起的结皮的时间独立变化; 土内动物扰动的影响。近年来, 试验研究除了注重土壤物理特性对坡面冲刷的影响之外, 也逐渐加强对土壤化学特性, 溶解过程等的研究, 因为这些特性和过程都与坡面土壤冲刷密切相关。

表 1 径流小区和土地利用管理的坡面冲刷实验国外研究进展

Tab. 1 Progress of abroad experimental study on slope surface wash of plot and land use			
研究者	时间	研究地区	研究内容及成果
Lal	1979	尼日利亚	坡度对不同农业措施下水土流失的影响, 探讨自然雨林被清除后栽种
	1980		油棕树的天然降雨侵蚀规律;
Hudson	1979	赞比亚	不同作物和耕作措施下的坡面水力作用;
Brain 等		Rift 河谷	人工降雨下不同岩性坡面发育过程, 并详细探讨了片蚀和细沟发生;
Dunne 等	1980	肯尼亚	研究了坡面冲刷过程和坡面流体力学;
Pla Sentis	1980	委内瑞拉	结皮状况及其对入渗、产流的影响;
Linden	1983	瓜哇中部	实验小区 (5 m × 2 m, 17° ~ 20°) 的径流和产沙状况;
Messer	1979		自然降雨峰值与水土流失峰值极大相关; 人工降雨条件下对土壤可蚀
	1980		性和产流情况进行了研究;
Chisci		比萨附近	研究不同耕作措施及作物的水土流失状况及坡长对土壤流失的影响, 现该试验已扩大至整个小流域;
Perieni-Birlad	1956 年	罗马尼亚	夏季暴雨农闲地小区径流系数可达 71%; 不同覆盖条件下土壤流失、
研究站	以来		
Pinczes 等	1981	匈牙利	径流与坡度的关系, 其试验最大坡度为 30°;
	1982		
Froehlich, Slupik	1981	波兰	土壤流失和低强度降雨明显相关; 雨强增大时相关关系明显降低; 径
	1982		
R. C. Wendt, J. M. Laflen	1986	美国	在 Szymbark 研究站用不同类型小区研究坡长对坡面流、流量的影响;
	1991		
Sumner	1996	美国	探讨休耕地径流小区产流与土壤流失的关系;
F. G. FrantiG. R. Foster	1996	美国	研究 WEPP 模型中草地及庄稼地土壤可蚀性;
S. M. Dabney, J. Sirvent 等	1996	美国	降雨模拟器及大型实验小区的产流产沙规律;
	1997		
	1997	美国	通过获取挟沙速率, 土壤流失和细沟几何学方面的资料, 研究农作物
			残留根茬对细沟发育的影响, 并通过计算机模拟建立了相关模型;
			研究生物篱与坡面产流产沙的关系;
			运用细沟测量设备研究坡地的侵蚀速率。

2. 2 国内研究进展

1944 年, 我国在甘肃省天水水土保持实验区首建坡地实验小区。随后, 水利部黄委会及西北水保所所属的水保站及地方水保单位都布设了大量的实验小区进行观测, 获得了比较宝贵的实验观测资料, 为水保和坡面流及坡地侵蚀动力过程研究奠定了基础。概括国内几十年来发展, 可分三个阶段^[3]:

(1) 初创阶段 (1944 ~ 1953): 以天水大柳树沟梁家坪为实验基地, 研究农坡地地貌及植被影响因子及农作措施的水保效益。

(2) 起伏发展阶段 (1954 ~ 1978): 1954 年径流小区由天水扩展到西峰小河沟 (代表黄土沟壑区) 及绥德韭园沟 (代表黄丘一区), 观测项目及小区数目都大为增加; 西北水保所和地方水保部门业先后开展了小区实验研究。但 1958 年及文革后期 (1970) 因认识及动乱影响, 小区观测工作基本停止; 1973 年小区观测实验虽有恢复, 但无大的进展。

(3) 新的发展阶段 (1978 年至今): 1978 年以来, 为治理黄土高原及南方红土区严重的水土流失, 加之中外合作项目及自然科学基金项目的推动, 新建和恢复了大批径流小区, 如绥德桥沟大型自然坡面径流场、西北水保所安塞纸坊沟径流小区及子午岭大型坡面径流场

和标准小区、山西水保所管道梁试验场。广东五华黄狗坑径流小区及德庆深涌实验站、河北张家口马家沟水保实验站、三峡秭归王家沟实验站等。

表 2 微型实验小区和微型流域的坡面冲刷实验国外研究进展

Tab. 2 Progress of abroad experimental study on slope surface wash of mini-plot and small watershed			
研究者	时间	研究地区	研 究 成 果
Emmett	1970	室内及野外实验, 包括对流形态、流深、流速、流量的观测	证实: 坡面流是 F_c 为 0.2 左右的临界流; Horton 坡面流由层流、紊流和过渡流组成; 雨滴击溅减缓坡面流速、增加阻力、产生扰动流; 微地形、流深、流速、对控制水流流向和集中十分重要; 有机质碎屑对拦蓄水流有明显作用, 尽管水流有不同程度的集中, 但没有出现细沟侵蚀; 土壤含水量的较小变化会对侵蚀速率产生重大影响;
Yair 等		以色列	揭示了非均质坡面物质对坡面冲刷水文学的影响及山麓堆积的发育过程; 动物扰动对结皮的破坏及土壤流失作用很大; 结皮过程及其影响因素十分复杂;
Hillel Bryan	1960	比利时	揭示了坡面阻力中独立时间变量的重要性; 土表结皮影响坡面冲刷过程
De pdoey	1989		有两方面: 减低入渗能力和增加坡面对拖曳力的抵抗, 这二者对坡面冲刷过程有很大作用;
Savat Poesen	1980		
	1977		不连续坡面径流搬运粒径 $> 0.22\text{ mm}$ 的粗粒, 溅蚀只搬运 $0.125 \sim 0.6$ (?) mm 之间的颗粒; 当不连续径流出现, 土粒搬运出现明显分选现象; 连续薄层出现时, 甚至会出现更好的分选。坡度大小决定了薄层流及亚临界流的 F_c 变动范围为 $1 \sim 3.43$;
Bryan 等	1978 1979	加拿大- 以色列合作	不同岩性的坡面, 产流临界, 产流系数及表面冲刷形式明显不同; 细沟冲刷与表面物质特性及坡面断断续续的管流密切相关; 详细探讨了坡面片流及细沟流的流态变化及土壤含水量的影响;
	1987 1989		
Dunne 等	1980	英美合作在肯尼亚南部	对缓坡上入渗、产流和坡面冲刷水动力进行了实验研究; 结果证实了坡度和表面阻力的不同导致了水文形态与峰值流量的主要变化
Mogan	1980	英国	将坡面水力特性与沉积搬运联系起来; 搬运采用 Engeland 托运方程 (1976) 和修正的曼宁流速方程计算, 预测与观测资料相关很好;
Bryan, Luk 等	1987	加拿大	分析了坡面冲刷过程的实验重现问题, 发现不同试验者、不同降雨机及不同实验步骤所得资料很难直接对比;
Bork 等	1982	西班牙南部	产流与入渗能力的时间衰减函数密切相关, 坡面流流态很不规则;
Scoging	1980		验证一个侵蚀模型, 该模型包括随时间衰减的渗透方程、侧向壤中流及坡面流时空连续方程和流量方程。这代表着将坡面冲刷试验直接与理论和数学模型相联结的方向;
Band	1985	加里福尼亚北部	利用所得资料得出一个泥沙搬运方程;
De Roo 等	1992	欧洲	黄土入渗及其在坡面流、坡面侵蚀模型中的应用;
A. J. Parsons	1996	美国	研究干旱荒漠地区坡面流及其侵蚀过程;
Romkens	1997	美国	探讨结皮土壤的可蚀性及侵蚀模型。

近年来, 黄道友等 (1995, 湘北马家峪)^[18]、王百田等 (1994, 山西省方山县)^[19]、贾志军等 (1990, 山西水保所管道梁试验场)^[20]、王贵平等 (1992, 晋西黄土丘壑区)^[4, 20]、杨玉盛等 (1996, 福建长汀县河田镇)^[21]、阮伏水、等 (1996, 福建安溪官桥)^[22]、史学正等 (1995, 江西鹰潭中科院红壤生态站)^[23]、吕甚吾等 (1992, 四川南充县)^[24]、靳长兴等 (1994,

广东五华)^[25]、丘世均等 (1992, 广东德庆)^[26]、蔡强国等 (1996, 河北张家口)^[27] 分别进行了径流小区试验, 对不同坡度、不同土壤含水量条件、不同土地利用方式及不同降雨条件下坡面土壤入渗、结皮、产流及土壤侵蚀诸方面进行了广泛研究, 并探讨了适合当地情况的治理模式及水土保持措施的效益。

西北水保所在陕北安塞水土保持综合站设置了土壤侵蚀实验场。王玉宽等 (1991)^[28]、刘志等 (1992)^[29] 分别在此通过径流小区实验研究了坡度及降雨对片蚀的影响; 张克利 (1991)^[30] 在此观测研究了浅沟侵蚀; 周佩华等 (1993)^[31]、刘国彬等 (1996)^[32] 用消防车运水, 采用人工降雨小区试验对比分别研究了土壤抗冲性及抗蚀性。郑粉莉、唐克丽等 (1994)^[33] 对子午岭大型坡面径流场和标准小区的径流泥水监测方法进行探讨, 结果发现: 林地中两者结果类似; 非林地中标准小区有局限。蔡强国等 (1996)^[27] 利用张家口、三峡秭归的资料分析了坡长的影响及生物篱的水保作用。

上述试验类型都是以野外实验为基础。但坡面冲刷过程的许多方面难以在野外准确的研究, 因而许多研究者常结合进行室内试验, 并从中取得一些巨大进展。

3 坡面实验研究中存在的问题

3.1 实验设备和技术方面^[34~36]

坡面流及坡面动力侵蚀过程的研究进展依赖于实验观测技术和设备的突破。未来人工模拟降雨设备首先要与计算机高度一体化, 其次要尽可能全面同时模拟自然降雨的均匀性、雨滴级配、中值滴径、动能和雨强; 坡面流速的测定设备力求结合激光和自动化技术, 适时多断面测定坡面流的流速; 坡面流水深的直接测定技术需要有大的突破, 必须解决水层特薄及含沙量较大的问题; 坡面侵蚀微形态的变化摄影观测设备技术也需提高。

3.2 实验研究内容^[37, 50, 51]

今后的室内外实验研究应增加产流产沙的过程观测, 全面分析坡面流的形成机理及变化过程, 深入研究坡面动力侵蚀过程的演变规律, 结合现代技术探索建立实用的基于物理过程的坡面流模型及坡面侵蚀预报模型, 同时结合节水农业、旱作生态农业、农林复合系统等来研究水保新途径。

3.3 野外径流小区实验^[40~45]

径流小区实验是世界上研究坡面冲刷的代表性方法之一, 其初衷是为了研究实际土地管理措施, 集中评价各种土地利用方式和各种影响土壤流失的环境因素。其后, 径流小区实验用于研究坡地地貌过程。侵蚀地貌的研究需要详细观测产流产沙过程, 以及土壤前期含水量、抗剪强度、侵蚀土壤和原始土壤的容重等土壤基础资料, 最好能频繁连续地监测。径流小区实验研究必须体现出水文学、水力学、土壤力学、泥沙运动力学、地貌学、土壤侵蚀学、农学等多学科多种技术相互交叉渗透的现代发展趋势。

小区实验资料的可比性^[10, 42]: 由于试验目标、区域局限、使用概念系统及设备的不同, 试验方法也有很大差异, 因而资料的对比研究大受限制。资料的对比必须考虑小区边界的影响。只有同样或类似降雨设备、同样地貌条件、同样土壤、同样大小的小区所得实验资料才有可比性。因此应尽快建立统一标准小区, 规范观测手段和程序, 力争减少各自为战及不必要的重复劳动。这就要求探讨适于不同地区的标准小区尺寸问题, 例如小区的长度

明显要长到让坡面冲刷过程充分发育, 包括细沟, 乃至浅沟、切沟的发生, 但实践中很难确定最佳坡长。

参考文献:

- [1] 哈德逊著 N W. 土壤保持[M]. 窦葆璋译. 北京: 科学出版社, 1975.
- [2] Kirkby M J, Morgan R P C. Soil Erosion. John Wiley & Sons[M]. A Wiley-Interscience publication, 1980.
- [3] 孟庆枚主编. 黄河泥沙[M]. 黄河水利出版社, 1996.
- [4] 山西水保所等. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [5] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J]. 水土保持通报, 1997, 17(3) 37~43.
- [6] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [7] 范荣生, 李占斌. 用降雨侵蚀的人工模拟降雨装置实验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2).
- [8] 赵志进, 李桂英. 人工模拟降雨机具和方法的发展研究与展望[J]. 中国水土保持, 1989(6) 30~33.
- [9] 蔡强国. 流域产沙模型概述[J]. 中国水土保持, 1990, 6 14~18.
- [10] Slaymaker ed. Field Experiments and Measurement Programs in Geomorphology[M]. University of British Columbia Press, 1991. 107~167.
- [11] 蔡强国. 坡面侵蚀产沙模型的研究[J]. 地理研究, 1988, 7(4) 94~101.
- [12] Laflen J M et al. WEPP, soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils[M]. Jour. of Soil and Water Conservation, 1991. 39~44.
- [13] Wendt R C, Alberts E E, Hjelmfelt A T Jr. Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50 730~736.
- [14] Summer H R et al. Rainfall simulator and plot design for mesoplot runoff studies[J]. Trans. of the ASAE, 1996, 39(1) 125~130.
- [15] Franti T G, Foster G R, Monkie E J. Modeling the effects of incorporated residue on rill erosion, part I. model development and sensitivity analysis[J]. Trans. of the ASAE, 1996, 39(2) 535~550.
- [16] Sirvent J et al. Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques[J]. Geomorphology, 1997, 18 61~75.
- [17] Romkens M J M et al. Soil erosion modes of sealing soils: a phenomenological study[J]. Soil Technology, 1997, 11 31~41.
- [18] 黄道友, 彭廷相等. 坡地不同利用公式下的地表径流状况研究[A]. 见: 彭廷柏等主编. 湖北红壤低丘岗地农业持续发展研究[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 21~25.
- [19] 山西水保所等. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [20] 王百田, 王斌瑞. 黄土坡面地表处理与产流过程的研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2) 18~24.
- [21] 杨玉盛等. 不同治理模式对严重退化红壤抗蚀性影响的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2).
- [22] 阮伏水, 周伏建. 花岗岩不同土地利用类型坡地产流和入渗特征[J]. 土壤侵蚀水土保持学报, 1996, 2(3) 1~7.
- [23] 史学正等. 土壤可蚀性研究现状[J]. 中国水土保持, 1993(5) 25~29.
- [24] 吕甚悟. 降雨及土壤湿度对水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1992, 29(1) 94~103.
- [25] Jin Changxing, Zang Guohua. An experiment study of sheet erosion in granitic region of Wuhua county. Guangdong province[J]. The Journal of Chinese Geography, 1994, 4(3).
- [26] 中加水土保持协作组. 广东省水土保持研究[M], 1989.
- [27] 蔡强国等主编. 永定河上游张家口市水土流失规律与坡地改良利用[M]. 北京: 环境科学出版社, 1995.
- [28] 王玉宽等. 黄土高原坡面降雨产流过程的实验分析[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2).
- [29] 西北水保所集刊(第7集)[C]. 陕西科技出版社, 1990年.
- [30] 张科利. 浅沟发育对土壤侵蚀作用的研究[J]. 中国水土保持, 1991(1) 17~19.
- [31] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3) 29~33.

- [32] 刘国彬, 张光辉. 原状土冲刷法与人工模拟降雨法研究土壤抗冲性对比分析[J]. 水土保持学报, 1995.
- [33] 郑粉莉, 唐克丽等. 标准小区和大型坡面径流场径流泥沙监测方法分析[J]. 人民黄河, 1994(7) 17~27.
- [34] 陈文亮, 王占礼. 人工模拟降雨特性的试验研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(2) 55~62.
- [35] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [36] 蒋定生等. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 9.
- [37] 沈晋, 王文焰, 沈冰等. 动力水文实验研究[M]. 陕西科技出版社, 1991.
- [38] Carson R P C, Kirkby M J. Hillslope Form and Process[M]. London: Cambridge University Press, 1972.
- [39] Kirkby M J (ed.). Hillslope Hydrology, John Wiley, sons, Ltd. A Wiley interscience publication[M], 1978.
- [40] 蔡强国, 吴淑安, 马绍嘉等. 花岗岩发育红壤坡地侵蚀产沙规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996. (1). Abrahams (ed.), Hillslope Processes. Allen & Unwin. Inc, 1986.
- [41] 陈浩等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [42] 雷阿林等. 土壤侵蚀模型实验中的降雨相似性问题[J]. 科学通报, 1995, 40(21).
- [43] 雷阿林等. 土壤侵蚀模型实验中的土壤相似性问题[J]. 科学通报, 1996, 41(14).
- [44] Selby M J. Hill Slope Materials & Processes[M]. Oxford University Press, 1993.
- [45] Andrew Goudie, the changing Earth[M]. Black Well, 1995.

The recent development of experiment on hillslope erosion processes

HU Shi-xiong, JIN Chang-xing

(The Institute of Geography, Chinese Academy of Science, Beijing 100101)

Abstract: The progresses of experimental devices and skills on overland flow and hillslope processes are summarized in this paper. It shows that the tendency of rainfall simulated device and equipment is automation, large scale for whole slope experiment and mini-type for field simulation. The content of experiment focus on rainfall splash, soil crusting processes, overland flow, rill erosion, gully erosion, and the benefit of soil erosion control.

On the basis of reviewing abroad and domestic recent development of field plot experiment, the problems and futures of researching on these fields are put forward from experimental device and skill, experimental content, field plot observation. The main problems of experiment device include the apparatus of observing the velocity and depth of overland flow, and the laser mirecoreliefmete. The field plot data should pay more attention to the processes of runoff and sediment yield, so as to study the mechanism of slope erosion and build the process-based model of water erosion prediction. The problem urgent to be solved is the comparability between the field and laboratory data.

Key words: experiment development; overland flow; hillslope processes; erosion