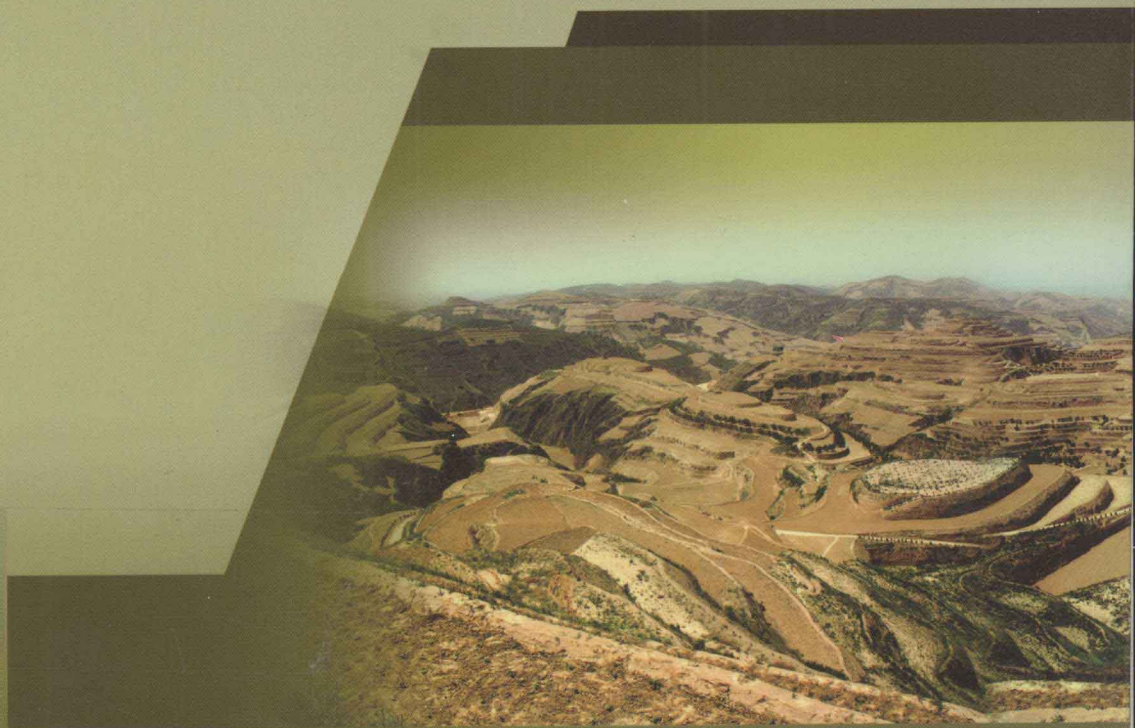


POMIAN GOUDAO SHUILI QINSHI JI

HUANGTU POGOU OUHEXITONG JINGLIU SHUSHA NENGLI SHIYAN YANJIU

坡面沟道水力侵蚀及 黄土坡沟耦合系统径流输沙能力试验研究

田 凯 姚文艺 李小青 著



黄河水利出版社

坡面沟道水力侵蚀及黄土坡沟耦合系统 径流输沙能力试验研究

田 凯 姚文艺 李小青 著

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以黄土高原丘陵沟壑区为研究背景,以丘陵沟壑区侵蚀地貌形态为概化模式,采用变坡度坡沟系统和坡面概化模型,通过野外调查、模型试验、人工模拟降雨和径流冲刷试验,深入认识坡沟侵蚀动力过程和系统产流、产沙过程,揭示其发生机理和时间、空间分布规律;结合泥沙运动力学理论和河流泥沙输移理论,建立坡面径流输沙能力、坡沟耦合系统侵蚀产沙及坡面与坡沟水流挟沙力等方面的定量关系,为建立流域土壤侵蚀模型提供基础支持。

本书可供从事水土保持学、环境科学、地理学、土壤侵蚀力学、泥沙运动力学等方面工作的研究、管理人员及高等院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

坡面沟道水力侵蚀及黄土坡沟耦合系统径流输沙能力
试验研究/田凯,姚文艺,李小青著. —郑州:黄河水利出版
社,2010.12

ISBN 978 - 7 - 80734 - 964 - 8

I. ①坡… II. ①田… ②姚… ③李… III. ①黄
土高原 - 径流 - 输沙量 - 研究 ②黄土高原 - 土壤侵蚀 -
研究 IV. ①S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 251468 号

组稿编辑:岳德军 联系电话:13838122133 E-mail:983375628@qq.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hslcs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:890 mm × 1 240 mm 1/16

印张:11.75

字数:215 千字

印数:1—1 000

版次:2010 年 12 月第 1 版

印次:2010 年 12 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

序

土壤侵蚀与产沙,尤其是降雨径流所引起的水力侵蚀产沙问题,是当今世界普遍存在且最为严重的环境问题之一。水力侵蚀造成的水土流失,常常淤废水库、抬高河床、阻塞河道,加剧洪水灾害发生;水土流失挟带土壤中的大量营养物质,导致土壤贫瘠;进入河流、水库的泥沙及其所挟带的大量污染物,造成河湖水质污染,危害人类及水生生物的健康乃至生命安全……可以说,土壤侵蚀及由此引发的一系列灾害,对人类社会的发展和进步具有重要影响。

土壤侵蚀与水土流失在世界范围内广泛存在,而不同地区具有不同的特点,但是都把坡沟水土流失的试验研究和治理列为水土保持工作的重点。水力侵蚀是土壤侵蚀的主要形式之一,因此开展水力侵蚀的研究,探索水力侵蚀产沙规律,对于土壤侵蚀和水土流失的防治及各类泥沙灾害的治理,具有重要的科学意义和实践意义。自 20 世纪 30 年代起,以 Duley D. Hbys、Hendzinksen 等一批学者开展的侵蚀小区试验、人工模拟降雨侵蚀试验为主要标志,人们对水力侵蚀进行了系统的研究,并且随着流域治理开发和生态环境建设的发展而逐步受到人们的广泛重视。随着各种研究手段和试验方法的不断进步,新的观点和成果不断涌现,使土壤侵蚀方面的研究得到迅速发展。

降雨产汇流和洪水演进是造成土壤水力侵蚀的直接水动力条件,相对于土壤侵蚀而言具有广泛性,对其研究也具有普遍性。迄今为止,关于降雨产汇流及洪水演进的研究成果,特别是基于机理性揭示的研究成果较为完善,且在生产上得到了广泛应用。然而,与此相应的土壤侵蚀研究,由于不同地区的土壤组成不同,造成的侵蚀强度不同,由此产生的影响度差异较大。因此,对其研究的普遍性受到制约,即便是不同国家开展了相应的研究,但因所关注的目标不尽相同,致使研究成果的使用被限制在不同的具体条件下,难以推而广之。

我国是世界上土壤侵蚀和水土流失最为严重的国家之一,而黄土高原又是我国土壤侵蚀和水土流失最为严重的地区之一,具有典型性和代表性。特别是在黄土高原的黄土丘陵沟壑区,在内外营力的作用下,发育成梁峁坡、沟谷坡和沟谷底三个各具特征的类型地带,不同地带具有不同的侵蚀类型或不同侵蚀类型的组合。对于美国和欧洲,其广泛分布的陆地坡面,特别是坡耕地,是降雨径流和侵蚀产沙的主要来源地,其水土流失主要导致土壤肥力下降,生产能力降低。相比较而言,黄土高原的土壤侵蚀类型与美国和欧洲单一的缓坡水力侵蚀

类型相比,其复杂性不仅反映在侵蚀类型上,更重要的是不同侵蚀类型的侵蚀机理差异较大,并且具有一定的随机性,在相似的降雨和土壤组成情况下,土壤侵蚀在某一个区域可能发生,而在另一个区域却不一定发生。

我国的土壤侵蚀规律研究是从黄土高原开始的,并一直将其作为研究和治理的重点。黄土高原严重的水土流失导致生态环境的持续恶化,严重威胁着当地人民群众的生活、生产和生存条件,制约着我国西部地区经济社会的发展,阻碍着当地全面建设小康社会目标的实现。同时,大量泥沙进入黄河河道造成河床持续抬高,河流生态失衡,严重威胁着黄河的健康生命。为此,国家对于解决黄土高原土壤侵蚀和水土流失的重大科学技术问题给予了高度重视,通过国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划等多方面的渠道,重点资助开展了多项重大重点研究项目,也取得了大量有价值的成果。

田凯等撰写的这部专著,以黄土高原小流域土壤侵蚀和水土流失问题为研究主体,采用变坡度坡沟系统和坡面概化模型,结合人工模拟降雨试验与径流冲刷试验,揭示坡面汇水汇沙作用下的坡沟侵蚀产沙关系,并通过室内径流冲刷试验,在对试验数据进行统计分析的基础上,研究建立起水动力学参数和坡面剥蚀率的定量关系;根据试验数据分析,找出坡面径流输沙平衡时的饱和含沙量及对应时刻的坡面水动力学参数,并结合泥沙运动力学理论建立坡面径流输沙能力公式;以坡沟径流侵蚀水动力学特性理论为基础,通过人工模拟降雨试验,深入认识坡沟侵蚀动力过程和系统产流、产沙过程,揭示其发生机理和时间、空间分布规律;通过模型试验,对坡面来水来沙作用,坡沟系统有、无来水来沙情况下的输沙率变化过程,坡沟系统有、无来水来沙情况下的径流变化过程,坡沟系统有、无来水来沙情况下的输沙率变化过程,坡沟系统有、无来水来沙情况下的含沙量变化过程等进行分析研究,建立梁峁坡面来水量、含沙量与沟谷净侵蚀量的耦合关系;借鉴河流泥沙输移理论,建立坡面和坡沟水流挟沙力公式,为土壤侵蚀预报提供坡面输沙力学基础模型;定量描述坡面侵蚀产沙对沟坡侵蚀产沙的影响作用,建立坡沟系统的耦合侵蚀产沙关系。

关于土壤侵蚀和水土流失的研究是一个十分复杂的课题,许多问题还有待进一步研究和探索,相信本书的出版能够对于深入认识和研究黄土高原土壤侵蚀机理和水土流失规律,促进不同类型和区域土壤侵蚀与水土流失问题的研究,为黄土高原水土流失的治理和生态环境的健康发展提供技术支持,起到积极的作用。

田凯

2010年9月

前言

黄土高原总面积 64 万 km^2 , 大部分地区位于干旱半干旱地区, 并被厚度为 50 ~ 100 m 的黄土层覆盖, 局部厚度可达 250 m 以上, 是世界上黄土分布最集中、覆盖厚度最深的区域。黄土的主要成分为粉粒, 结构松散, 孔隙度大, 透水性强, 遇水易崩解, 抗冲蚀性差, 在一定的条件下极易形成土壤侵蚀。遥感资料显示, 该区水土流失面积达 45.4 万 km^2 , 其中水力侵蚀面积 43 万 km^2 , 约占其水土流失总面积的 94.7%, 占全国水力侵蚀面积的 24%。该区自然环境复杂, 产沙地层多样、侵蚀类型多且相互耦合, 流域系统能耗过程的非线性特性非常突出, 侵蚀过程对地貌边界条件和动力条件的变化反应敏感, 使得目前对诸如流域水土流失规律、坡沟系统径流侵蚀水动力学机理分析、坡沟系统侵蚀产沙耦合关系等问题的研究仍未取得重大突破, 直接制约了黄土高原水土流失治理的纵深发展。因此, 开展坡沟水力侵蚀和黄土坡沟耦合系统径流输沙能力研究, 既是进一步认识黄土高原水土流失规律的需要, 又是有效开展黄土高原水土流失治理和治黄生产实践的迫切需求。

本书以黄土高原丘陵沟壑区为研究背景, 以丘陵沟壑区侵蚀地貌形态为概化模式, 通过野外调查和模型试验, 采用变坡度坡沟系统和坡面概化模型的人工模拟降雨试验与径流冲刷试验相结合的方法, 综合运用多学科知识, 通过模拟试验揭示坡面汇水汇沙作用下的坡沟侵蚀产沙关系, 在坡面侵蚀模拟研究、坡沟耦合系统侵蚀模拟研究、坡面沟道侵蚀模拟研究等方面, 得到一系列研究成果, 进一步丰富了关于坡沟系统的侵蚀产沙耦合特征、坡面流输沙能力、坡沟系统侵蚀产沙机理和坡面流输沙规律方面的理论和实践, 为流域土壤侵蚀模型的建立提供了基础, 对于科学制定水土保持规划, 优化配置水土保持治理措施也具有一定的指导意义。

本书共分 7 章。第 1 章绪论, 通过广泛查阅国内外文献资料, 客观分析了国内外关于坡面、沟道和坡沟系统侵蚀机理、特性及产沙规律的研究现状, 结合黄土高原特性和生产实践需求, 确定了研究方向、研究内容和技术路线; 第 2 章, 运用相关理论并结合试验, 对坡面流侵蚀的特征、规律, 坡面流侵蚀产沙影响因素、产沙过程及相互之间的关系进行了研究; 第 3 章, 针对沟道侵蚀与输沙过程, 系统分析和总结了沟道类型及侵蚀形式、沟道侵蚀影响因素、沟道侵蚀机理等方面的特征与规律; 第 4 章, 运用相关理论并结合试验, 对坡面侵蚀的机理、特性、时

空变化及影响因素进行了深入研究分析,理清了坡面侵蚀与径流流量、动能、阻力变化、坡度等诸多影响因素之间的关系,提出了坡面径流侵蚀挟沙规律及挟沙力公式;第5章,通过人工模拟降雨试验,对降雨实测的径流、产沙和时间等数据进行统计分析,并运用相关理论,把坡面侵蚀引入到对坡沟系统侵蚀产沙机理和耦合关系的研究,进一步明确了在坡沟系统的侵蚀过程中,雨强、时间与径流量、产沙量、输沙量的相关关系,以及坡面来水含沙量与沟坡部分的侵蚀产沙量等方面的耦合关系等,对于进一步开展坡沟系统水土流失治理提供了理论基础;第6章,利用概化模型和放水冲刷试验,从水动力学角度探讨了坡面植物措施对坡沟系统挟沙水流的影响及作用、侵蚀产沙规律、植被的水土保持作用机理,进一步揭示了坡面草被盖度及其空间配置的减蚀作用;第7章,在前面研究的基础上,总结了主要研究成果,鉴于黄土高原坡面及坡沟系统水蚀过程的复杂性,也对成果中存在的局限性和不足之处,提出了研究建议和展望。

在研究过程中,作者得到了中国工程院王浩院士、黄河研究会黄自强理事长(教授级高工)、黄河上中游管理局何兴照副局长(教授级高工)、黄河水利委员会尚宏琦局长(教授级高工)、黄河水利委员会汪习军局长(教授级高工)、黄河水利科学研究院时明立院长(教授级高工)、黄河水利科学研究院水土保持研究所史学建所长(教授级高工)、华中科技大学土木工程与力学学院朱宏平院长(教授、博导)、华中科技大学水电与数字化工程学院周建中院长(教授、博导)、中国水利水电科学研究院蒋云钟教授的指导和帮助,他们对本书提出了许多宝贵的意见和建议,在此向他们表示衷心的感谢。

本书在写作过程中,先后得到了不少同行前辈、专家、学者,以及同事和朋友的热心帮助,在此向他们一并表示衷心的感谢。

在此,还要特别感谢黄河水利出版社副总编岳德军编审的大力支持和帮助。

本书中的研究工作得到了科技部国家重点基础研究发展规划(973)和国家自然科学基金委员会重大项目的基金资助。国家重点基础研究发展规划(973)课题名称:不同类型区土壤侵蚀过程与机理,编号:2007CB407201;国家自然科学基金重点项目名称:基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程,编号:50239080。

真诚期待所有读到这本书的前辈、同行和学者,对本书的不足之处给予批评指正。

作者
2010年9月

目 录

序

王 浩

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 国内外研究综述	(2)
1.3 研究内容、技术路线	(18)
第2章 坡面流侵蚀产沙过程	(20)
2.1 坡面流侵蚀产沙机理及力学分析	(20)
2.2 坡面流侵蚀产沙影响因素	(25)
2.3 坡面水力侵蚀产沙过程	(36)
第3章 沟道侵蚀与输沙过程	(51)
3.1 沟道类型及侵蚀形式	(51)
3.2 沟道侵蚀的影响因素	(55)
3.3 沟道侵蚀机理	(60)
第4章 坡面径流水动力学特性及输沙能力研究	(63)
4.1 坡面模拟与试验测量方法	(63)
4.2 坡面产生细沟、浅沟侵蚀时的径流临界剪切应力	(65)
4.3 坡面流阻力变化特征	(78)
4.4 坡面径流挟沙力	(90)
4.5 小 结	(95)
第5章 坡沟耦合侵蚀关系及其产沙机理	(97)
5.1 坡沟耦合下的流域地貌形态发育过程	(97)
5.2 流域侵蚀试验模型设计与试验方案	(103)
5.3 坡沟耦合下的流域地貌形态发育过程	(108)
5.4 坡沟耦合的侵蚀产沙关系	(114)
5.5 小 结	(128)
第6章 坡沟系统产沙对植被的响应关系	(130)
6.1 试验设计与方法	(130)
6.2 植被对坡沟系统径流水力特性的影响	(132)

6.3 坡面草被对坡沟系统侵蚀产沙过程的影响	(151)
6.4 小 结	(164)
第7章 结论与展望	(167)
7.1 主要结论	(167)
7.2 关键技术与创新点	(170)
7.3 展 望	(170)
参考文献	(172)

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

我国黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一,生态环境极其恶化。据 1990 年遥感调查资料显示,黄土高原地区总面积 64 万 km^2 ,水土流失面积 45.4 万 km^2 ,占该地区总面积的 70.9%。水土流失面积中,侵蚀模数大于 8 000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的极强度侵蚀面积达 8.5 万 km^2 ,占全国同类面积的 64%;侵蚀模数大于 15 000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的剧烈侵蚀面积达 3.67 万 km^2 ,占全国同类面积的 89%;尤其在中游河口镇至龙门区间、泾河、北洛河上游等多沙粗沙区,面积为 7.86 万 km^2 ,仅占黄土高原水土流失面积的 17.3%,输沙量却占黄河的 63%,粗沙量占黄河粗沙总量的 73%。同时,黄河流域的土壤侵蚀速度也是世界罕见的,在陕北北部和内蒙古东南部的黄土区域侵蚀量可达 3~5 cm/a ,其中陕北子洲团山沟流域侵蚀模数达 23 948.1 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。根据全国土壤侵蚀强度图统计计算,黄河流域土壤侵蚀量为每年 22.8 亿 t。黄土高原水土流失产生的大量泥沙进入黄河下游河道,大量沉积,造成河床抬高,使黄河下游成为举世闻名的地上“悬河”,是黄河下游河患的根源。水土流失引发的生态问题直接影响了当地农业生产的稳定发展,加剧了当地的贫困,成为制约黄河流域乃至我国国民经济整体可持续发展和社会进步的重要因素。因此,加强黄土高原地区土壤侵蚀机理性研究,为黄土高原水土流失治理提供技术支持,已经成为当代科研工作者迫在眉睫的任务。

黄土高原可分为两大地貌单元,即沟间地和沟谷地,一般以沟缘线为界将其以上部分的侵蚀称为坡面侵蚀,以下部分的侵蚀称为沟道侵蚀。坡面沟道系统(简称坡沟系统)是小流域侵蚀产沙和水沙传递关系分析的基本地貌单元,也是控制水土流失、恢复与重建生态环境治理的基本单元。坡沟系统侵蚀产沙关系的研究关系到黄土高原水土流失治理方针和策略的制定。曾伯庆通过分析山西羊道沟资料得出,沟坡地接受沟间地径流的侵蚀产沙量是沟坡地不接受沟间地径流的 4.5 倍。徐雪良得出韭园沟流域沟间地径流量占 35.3%,泥沙占 30.8%。陈永宗等分析了陕北子洲团山沟黄土沟坡受沟间地径流下沟影响的侵蚀产沙量是不受径流下沟影响侵蚀产沙量的 5 倍。陈浩定量研究了坡面来水来

沙引起的净侵蚀量及含沙水流的侵蚀特性,认为坡面来水来沙在小流域产沙中起决定性作用。雷阿林利用室内建立的二维坡段组合模型,研究了上坡来水对不同坡段产沙的贡献,结果表明由于上坡来水的作用,梁崩坡面的产沙量增大了 20.2% ~ 63.5%,谷坡的产沙量增大了 42.9% ~ 74.5%。近期,郑粉莉等利用双土槽径流小区对上方来水来沙的影响作用进行了研究,研究过程限于坡面尺度。丁文峰等通过概化的试验模型对径流冲刷条件下的坡沟侵蚀产沙耦合关系进行了研究。

尽管针对坡沟系统侵蚀产沙问题的研究取得了一系列的科学成果,但是仍有许多基础问题和关键技术未得到有效解决,如坡面径流输沙能力、坡沟系统侵蚀产沙特性、坡沟系统侵蚀产沙关系等,对该领域的发展具有一定的制约。鉴于此,本书采用变坡度坡面和坡沟系统概化模型及人工模拟降雨试验相结合的办法,通过模拟试验揭示坡面汇水汇沙作用下的坡沟侵蚀产沙关系,开展坡沟系统的侵蚀产沙耦合特征、坡面流输沙能力等方面的研究,对于丰富坡沟系统侵蚀产沙机理和坡面流输沙规律方面的理论和实践,建立流域土壤侵蚀模型具有重要意义,同时可以为科学制定黄土高原水土保持规划、优化配置水土保持治理措施提供有力的科技支撑。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 侵蚀与产沙的模拟试验研究

侵蚀与产沙的模拟试验,是地貌试验研究的一个重要分支。最早的流水侵蚀试验是法国学者 Noc 及 Margerie 在 1888 年进行的,主要用于研究侵蚀对地形的影响。其后,作为土壤侵蚀规律和力学机理研究的一个重要手段,侵蚀与产沙的野外及室内试验才逐步发展起来。

侵蚀与产沙的人工模拟,大多是利用模拟降雨的方法进行的,其内容从开始的单一溅蚀观测,到模拟降雨所产生的径流冲刷。随着观测技术的逐步改进,人们把溅蚀与径流冲刷作用结合起来模拟、观测,或是专门模拟坡面径流,观测冲刷规律和细沟水流的输沙机理。R·拉尔等对土壤侵蚀产沙的试验手段和方法都曾作过专门论述。伴随着模拟设备及观测技术的发展,沟道流域降雨—径流侵蚀产沙过程的模拟,在中国已开始起步。

利用人工降雨模拟土壤侵蚀的试验研究,在 20 世纪 30 年代初始于美国,苏联较其晚 16 年,中国较其晚 20 年。最早进行的模拟降雨试验,是从降雨量方面进行模拟的。1932 年美国的 Duley D. Hbys 开展的侵蚀试验小区面积为 $1.5 \text{ m} \times$

0.85 m。1934 年 Hendzinksen 在一个 $3.2\text{ m} \times 0.99\text{ m}$ 的小区上通过人工模拟降雨的方法研究土壤侵蚀;津格于 1940 年在面积为 $2.44\text{ m} \times 1.22\text{ m}$ 的试验小区上利用人工降雨研究坡度对土壤侵蚀量的影响。在 20 世纪 40 年代, J. O. Laws 和 D. A. Paisons 研究了雨滴大小、滴谱、雨滴终速及它们与降雨强度的关系, 为人工模拟降雨提供了重要的依据。Woodburn 于 1948 年在人工降雨的条件下进行了雨滴溅蚀量与降雨持续时间之间关系的定量研究, 他把试验土样盛在一个小容器内, 让它受雨滴击溅一定时间, 称出降雨前后试验土样的干重, 用两者之差作为土壤溅蚀量。1945 年 W. D. Ellison 利用人工模拟降雨进行了降雨强度和雨滴下降速度对土壤溅散量的试验, 并观测了雨滴在不同大小和速度下溅散泥沙颗粒的距离。1951 年 P. C. Ererm 利用人工降雨研究了溅蚀量同雨强的关系, 并做了不同坡度情况下落到下坡方向的泥沙百分比如何变化的试验。在 20 世纪 50 年代初, T. H. Neal 通过控制总降雨量, 造成不同的雨强, 使其产生不同径流的方法, 研究了径流的冲刷作用。1965 年帕尔默通过人工降雨试验, 研究了土壤表面具有不同水层深度时, 雨滴冲击力所引起的土壤流失。L. D. Meyer 和蒙克曾于 1965 年在实验室通过人工降雨, 用玻璃球作为无黏性床沙质进行了径流冲刷的模拟试验, 从而认识到坡面流期间, 土壤表面细沟的出现受坡度、流量和降雨的影响; 侵蚀强度随坡度和流量的增大而增大; 降雨的作用是使表面平坦, 从而使细沟化的粗糙表面变得光滑。在实验室内模拟坡面径流冲刷的还有肯里根(1944)、伊泽德(1944)、帕森斯(1949)、吴和布拉特(1962)、尤恩和温单尔(1971)等。20 世纪 70 年代, 沈学文等曾在实验室水槽内, 对坡面浅层水流的冲刷机理进行了研究。1976 年 G. R. Foster 等曾在室内用人工模拟降雨, 研究了坡面径流在凹形坡地上的输沙过程。同期, 李鲁明等利用模拟降雨在一个 $4.572\text{ m} \times 1.524\text{ m} \times 1.219\text{ m}$ 的可自由调节坡度的水槽内, 通过填充中值粒径为 0.35 mm 的土粒的办法, 进行了地表径流引起的土壤侵蚀试验。20 世纪 60 年代以后, 随着科学技术的进一步发展, 出现了模拟雨强更高、降雨覆盖面更大、雨滴下落距离更高的人工降雨装置, 从而使得野外人工降雨的试验得以更好地实现。利用野外人工降雨在任一时间内都可以对农地或其他试验小区施加设计暴雨, 研究在各种降雨条件下产生的径流和土壤流失量。20 世纪 70 年代中期, D·G·德库西和 L. D. Meyer 等曾使用人工降雨的方法在野外研究细沟和细沟间的侵蚀量。

我国从 20 世纪 50 年代后期开始引进和研制模拟降雨装置, 用于土壤侵蚀和径流观测的试验研究工作。最早进行这方面研究工作的有黄河水利科学研究所和中国科学院西北水土保持研究所。开始主要是在室内, 以后, 中国科学院北京地理研究所、铁路科学研究院西南研究所等单位也进行了模拟降雨的侵蚀研

究。中国科学院西北水土保持研究所、西峰水土保持试验站、陕西机械学院等单位,近年来都研制出了用于野外小区试验的人工降雨装置。其中陕西机械学院还采用先进技术,研制了一套人工降雨径流自动测流装置,用于计算地表径流的瞬时、累积流量,并能输出流量过程。

1990年,李勇、吴钦孝等在一个可调坡度的径流槽内,直接模拟坡面径流,进行了黄土抗冲性能的试验研究。

1.2.2 坡面侵蚀产沙研究

1.2.2.1 坡面流的水动力特性

坡面薄层流是侵蚀输沙的动力,认识坡面流的水动力特性是研究输沙能力的基础。坡面流水动力学特性包括水流流态、平均流速、平均水深和阻力系数等。因而,为了研究输沙能力,目前国内外对坡面流的水动力学特性开展了大量的研究工作。

水流流态是与坡面径流计算和输沙演算直接相关的,因此研究坡面水流流态具有实践意义。但是,由于坡面流受多方面因素影响,流态非常复杂,目前关于坡面流究竟属于何种流态仍处于研究中。在流态的研究方面,一般仍借鉴水力学中流态判别参数即雷诺数来研究坡面流流态。姚文艺对坡面流的阻力规律进行了研究,发现坡面流的 Darcy-Weisbach 阻力系数,与雷诺数的规律虽呈现出明显的分区规律,但根据 Re 与 f 的关系所判别的层流与通常定义的层流概念并不相符,因此称这种降雨扰动了的径流为伪层流(Pseudo-layer flow),另两种流态仍称之为紊流和过渡流;吴长文、王礼先也认为在降雨条件下自然坡面水流保持层流的条件是不存在的,因此坡面薄层水流并不是简单地遵循雷诺规律,它应该既不是层流,也不是充分紊流,而是一种介于它们之间的特殊流动。对坡面流平面流动形态的研究显示,天然土坡或裸地的突起高度通常在 10 mm 以上,因此深度仅为 0.5 ~ 2.5 mm 的薄层水流不可能漫流于全部坡面,它必然选择发育流道、绕道而行的方式;江忠善等认为坡面流是介于层流到紊流的过渡流;雷阿林认为坡面流受下垫面和降雨影响,既非稳定又不均匀,且有急流特点,流态介于层流与紊流之间,细沟流已进入紊流范畴,沿程阻力变化不明显,急流影响突出;Emmett 通过试验观察认为坡面流不同于普通的层流、湍流及过渡流,由于雨滴打击,水流被充分扰动,湍动扩散强烈,这种水流状态虽然具有一些湍流性质,但同时也具有大部分层流的特征,因此称之为“扰动流(disturbed flow)”;Selby 认为坡面流是层流和紊流的混合。由此可以看出,关于坡面流流态究竟属于哪种形式,国内外各家的说法还很不统一,进一步加强此方面的研究是很有必要的。

坡面流速是计算坡面汇流和坡面冲刷的基础。它主要受地表特征、坡度和

坡面水深(或坡面流量)的影响。对坡面流流速研究的进展可归纳为对坡面流公式的研究和对坡面流速的测定两部分。

1) 坡面流公式的研究

为了解决实际问题,目前一般都将坡面流视为一维恒定非均匀沿程变量流。20 世纪 30 年代初,普罗托季亚科诺夫曾在草地上进行了 56 次流速测试,试验的单宽流量为 $0.40 \sim 9.51 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,坡度为 $0.25\% \sim 27\%$ 。得到草地的层流平均流速为

$$v = 0.05q^{\frac{1}{2}}J_0^{\frac{3}{16}} \quad (1-1)$$

式中 q ——单宽流量;

J_0 ——坡度。

后来,徐在庸等利用人工降雨也专门进行了坡面流速试验,对试验结果整理后,提出了流速公式为

$$v = kq^{\frac{1}{2}}J_0^{\frac{1}{4}} \quad (1-2)$$

式中 k ——系数,其值视坡面情况而定,草地为 3.0,裸地为 7.5。

V. T. Chow 在 1959 年提出一种最为简单的坡面均匀流流速公式为

$$v = Ky^{m-1} \quad (1-3)$$

式中 K, m ——常数;

y ——水深。

也有学者从其他角度研究坡面流速,如 L. Joe Glass 等根据人工降雨水槽试验,研究了降雨影响下的浅层明渠流的流速分布问题,其研究基于 L. Prandtl 的动量传递理论,认为此种情况下的流速分布仍然满足对数定律,即

$$\frac{v_y - v}{\sqrt{ghJ_0}} = A \lg \frac{g}{h} + E \quad (1-4)$$

式中 g ——自床面以上任意一点水深;

v_y —— y 处流速;

v ——断面的平均流速;

h ——总水深;

A, E ——系数,视床面情况而定。

根据吴普特的研究,坡面流速与坡长 x 之间符合下述指数关系,即

$$v = Ce^{-\frac{b}{x}} \quad (1-5)$$

式中 C, b ——与坡度和雨强有关的系数。

2) 坡面流速的测定

流速的测定比较困难,因为坡面流多为三维、非恒定、非均匀沿程变量流,坡

面水深一般很小,受降雨影响显著,流动边界条件十分复杂,试验测定的仪器还不能过分影响水流的流动。近年来,Abrahams 等采用断面分段法(Partial Section Method)测定表层平均流速。目前坡面流公式形式还主要借鉴明渠水力学的计算方法,公式使用范围还很狭窄,同时量测方法还很不完善,因此进一步加强坡面流流速公式的理论研究和测量方法的研发是很有必要的。

与平均流速一样,水流深度也是坡面流最基本的水动力学特性之一。但是由于坡面流水层浅,易受下垫面状况、植被覆盖、降雨及其扰动影响,同时又因测定手段的限制,其水深在野外条件下不易直接测得,因而目前对水流深度与流量和坡度间关系的研究并不深入,而且基本上都是在实验室条件下进行的。

初期对坡面流阻力的研究主要根据野外资料来确定,或通过回归分析,将它们与影响阻力的因素(Re 、雨强、土壤粒径等)联系起来,建立阻力公式。20 世纪 70 年代以来,对坡面流阻力做了大量的研究工作,并主要通过试验进行研究,包括室内模拟试验和野外径流小区试验,并且对阻力系数的探讨主要使用了 Darcy-Weisbach 阻力系数的概念。许多研究者认为坡面流的阻力主要与坡面流 Re 相关,阻力系数可表示为

$$f = \frac{K}{Re} \quad (1-6)$$

式中 Re ——坡面流雷诺数;

K ——与流态和地表条件有关的参数,对于层流流态, K 为常数($K=24$),对于湍流和混合流,Woolhiser 曾根据涨水径流过程线分析,确定出不同流态和地面特征情况下的 K 值。

一些研究者还研究了降雨对坡面流阻力的影响,认为坡面流阻力与水流流态有较大关系,而雨滴的打击作用和动能输入,扰动了表面水流,将增加湍动使阻力增大。研究表明,降雨增加的阻力一般情况下较小,但在层流缓坡时降雨阻力最大可以占到总阻力的 20%。

姚文艺对坡面浅层水流的阻力问题也进行了试验研究,分析了雷诺数、降雨强度、坡面粗糙度对坡面流阻力的影响,并针对过去研究坡度较小的缺陷,进行了一系列降雨情况下坡面流阻力试验,其坡度最大达到 20° ,研究发现坡度较大时,坡度值对阻力有较明显的影响,并得到降雨情况下的阻力系数关系式

(1) 层流区($Re < 800$)

$$f = \frac{24 + 3.453(1 + 1.359\sqrt{\Delta})S_0^{0.403}i^{0.734-0.315/\Delta}}{Re} \quad (1-7)$$

式中 i ——雨强;

S_0 ——坡度;

Δ ——粗糙度。

(2) 湍流区 ($Re > 2\ 000$)

对陡坡 ($S_0 > 30$)

$$f = \frac{(1.340 + 3.514\Delta) S_0^{0.465}}{Re^{0.5}} \quad (1-8)$$

对缓坡 ($S_0 \leq 30$)

$$f = \frac{0.285 + 0.62\Delta^{\frac{5}{7}}}{Re^{0.25}} \quad (1-9)$$

长期以来,坡面流阻力问题得到了大量广泛深入的研究,但由于问题异常复杂,尚无成熟而广泛适用的 Darcy-Weisbach 阻力系数公式。许多公式在使用时需要知道较多的参数,而且增加了求解的困难,因而实际应用时许多学者仍然使用简单的曼宁公式,即

$$q = \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (1-10)$$

式中 q ——单宽流量;

h ——水深;

S_0 ——坡度;

n ——糙率系数。

这些对坡面流复杂阻力规律的探讨,为今后合理表述坡面流阻力提供了很好的指导和试验及理论基础,也是值得进一步研究的重要内容,并促进其达到应用程度。

关于坡面细沟流发生过程与水力学临界条件也有不少研究成果,坡面流侵蚀中细沟的发育使坡面产沙量增加几倍至几十倍,细沟侵蚀量占坡面侵蚀量的70%以上。但迄今为止,坡面侵蚀过程由片状侵蚀转化为细沟侵蚀,这个“质变点”仍未得到合理解释,这也在一定程度上影响了坡面流侵蚀的研究。

目前,虽然对坡面细沟现象进行了较为详细的描述和理论分析,但是至今仍然没有一个参数能够完整地反映细沟发生的临界条件。大多学者采用的判断细沟发生的临界条件为:坡度、弗劳德数、雷诺数、断面比能、径流量、径流水动力、径流剪切应力或摩阻流速、土壤抗剪强度等。

丁文峰、李占斌等通过玻璃水槽试验和径流冲刷试验,研究了坡面径流的流速分布和坡面细沟侵蚀发生的临界条件,研究表明:径流在坡面上并非是以均匀流形式运动,而是以滚动的形式运动的,同时运用能量守恒原理分析了坡面土壤侵蚀率(D_r)与径流能耗(ΔE)之间的关系,建立了给定土壤条件下坡面土壤侵蚀率估算模型: $D_r = 0.002\ 6(\ln \Delta E - 2)$ 。张科利、秋吉康宏通过径流冲刷试验,

研究了坡面侵蚀方式由面状侵蚀向细沟侵蚀过渡、发展过程中径流的水动力学特征;根据侵蚀量的观测对比,提出了表明细沟开始产生的形态尺度大小及细沟侵蚀产生的临界条件。

目前对细沟流流动和阻力特性的研究还属起步阶段,人们的认识也还相当粗浅,有待于更细致的试验研究和理论分析。

1.2.2.2 坡面径流侵蚀及输沙力学机理研究

坡面径流的侵蚀及输沙的力学机理取决于坡面径流的水力学特性。由于坡面径流形成的复杂性、运动的非恒定非均匀性、流态沿程的易变性、边界条件的特殊性等,以致于无法对水力特性作出简单描述,对坡面径流的水力学理论研究进展也比较缓慢。

径流侵蚀力是人们在认识坡面径流侵蚀机理过程中最初所提出的一种概念,并借以说明坡面径流的侵蚀过程。比如,一般认为坡面土壤遭受侵蚀的状况取决于坡面径流所具有的侵蚀力 F_e 与地表土壤所具有的抗蚀力 R 之间的关系。

当 $F_e < R$ 时,不出现侵蚀;

当 $F_e = R$ 时,处于临界状态;

当 $F_e > R$ 时,出现侵蚀,它们之间的差值越大,侵蚀越严重。

但是究竟何为径流侵蚀力,最早的研究并未给出确切的定义。1945 年 R. E. Horton 使用剪切应力的概念研究侵蚀力问题,并把径流侵蚀力定义为沿坡面向下运动的径流所具有的剪切应力,表达式为

$$F_e = \gamma(qnx)^{\frac{3}{5}} \frac{\sin \alpha}{\tan^{0.3} \alpha} \quad (1-11)$$

式中 γ ——水的容重;

n ——地表的糙率;

q ——径流流量;

x ——测点离分水岭的距离;

α ——坡角。

然而,正如后来 M·A·维里坎诺夫所评价的那样,这样定义径流侵蚀力无论如何是不合理的,因为正如雨滴的全部动能并非完全作用于土壤表面一样,径流在从高处向低处流动时,由势能所转化的剪切应力也不会完全用于冲蚀土壤颗粒,而只是其中一部分。因而,只有直接作用在组成径流床面的土壤颗粒上,并起到促使土壤颗粒运动的那部分径流剪切应力,才是径流侵蚀力。

G. R. Foster 和 L. D. Meyer 曾在 1975 年提出用径流有效剪切应力的概念表达径流的侵蚀力。所谓有效剪切应力,是指作用在土壤表面的径流剪切应力,并指出坡面径流有效剪切应力同径流深、坡角和有被覆粗糙坡面上的径流速度与