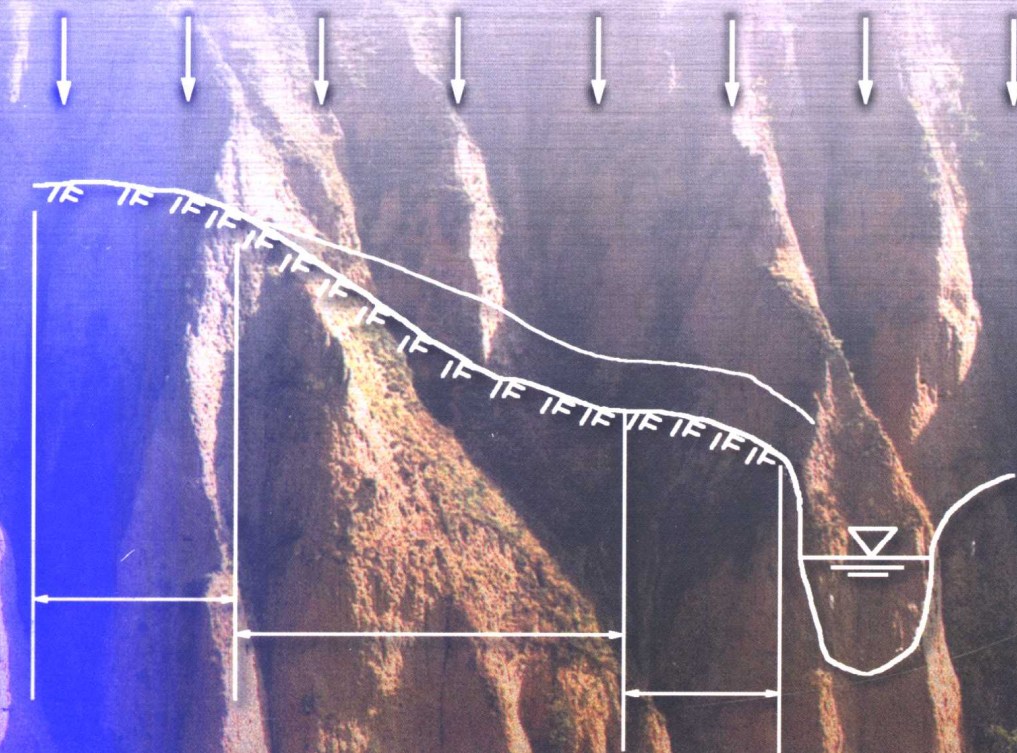


国家自然科学基金委员会和水利部联合资助重大项目

水力侵蚀

产沙过程及模拟

姚文艺 汤立群 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金委员会和水利部联合资助重大项目

水力侵蚀产沙过程及模拟

姚文艺 汤立群 著

黄河水利出版社

内 容 简 介

本书作者在对水力侵蚀产沙方面研究的基础上,从力学的观点,系统地论述了由降雨引起的土壤侵蚀、产沙的力学过程及其模拟技术。其内容除对降雨、径流的力学特性及其描述方法,坡面及沟道的水力侵蚀机理及产沙过程,降雨径流的力学特性和侵蚀产沙过程的试验、量测方法作了一定的介绍之外,作者还根据近年来在水力侵蚀产沙数学模拟方面的研究成果,分别提出了坡面侵蚀产沙数学模型、小流域产沙数学模型和大中流域产沙数学模型,并给出了相应的模拟应用算例。同时,书中还对国内外有代表性的成果进行了深入系统的评述,论及了有关水力侵蚀力学方面的前沿性问题。

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

图书在版编目(CIP)数据

水力侵蚀产沙过程及模拟/姚文艺 汤立群著. —郑州:黄河水利出版社,2001.10
ISBN 7-80621-500-X

I. 水... II. ①姚... ②汤... III. ①水蚀-泥沙-研究 ②水土保持-研究 IV. S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065078 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

印张:14.5

字数:251 千字

印数:1-1 500

版次:2001 年 10 月第 1 版

印次:2001 年 10 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-500-X/S·33

定价:30.00 元

前 言

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,在不少国家更为严重,这也是当今世界上最大的环境问题之一。中国在历史上就是土壤侵蚀相当严重的国家,全国国土面积 960 万 km^2 ,目前,水力侵蚀面积就占 179 万 km^2 ,若不扣除交叉侵蚀面积,其分布情况为:西北黄土高原 43 万 km^2 ;南方丘陵山区 46 万 km^2 ;长江上中游地区 55 万 km^2 ;东北黑土漫岗区 42 万 km^2 ;北方土石山区 21 万 km^2 。根据黄河、长江多年平均输沙量 20 多亿 t 计算,相当于每年毁坏约 40 万公顷肥沃的土地,其中,进入黄河的泥沙,多年平均就达 16 亿 t。正像有人指出的,黄河流的不是泥沙,而是中华民族的财富。除此之外,水力侵蚀造成的泥沙流失,常常淤废水库、抬高河床,加剧洪水灾害的发生;进入河流中的泥沙及其所挟带的大量污染物,还会造成水质下降,危害人类身体健康;因处理灌溉、工业和生活用水中的泥沙,又引起土地的沙化等环境污染灾害……可以说,土壤侵蚀及由此所形成的一系列灾害,已经对人类社会的发展和进步产生了极大影响。由于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,对于土壤侵蚀的防治和各类泥沙灾害的治理,具有极大的生产实践意义。同时,这一研究对于丰富地学等学科的内容,亦有很大的科学理论价值。

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,人们开始了对水力侵蚀的系统研究。随着流域开发治理和生态环境建设逐步受到人们广泛的重视,地学及环境科学诸多部门的专家都不断投身于土壤侵蚀领域的研究工作,各种研究手段和试验方法不断得到进展,新的观点和学说不断涌现,使土壤侵蚀研究迅速发展成为国际地学界学术气氛相当活跃的领域。国际水土保持大会(ISCO)、流域综合治理国际讨论会(ISWM)等定期或不定期的国际性学术大会,在国际范围内汇集了众多从事土壤侵蚀、水土保持、生态环境等方面的专家,探讨土壤侵蚀过程、流域产沙与输沙过程、土壤侵蚀预测和预报、流域管理与开发、土壤侵蚀对环境的影响、水土保持技术与方法等有关议题。除此之外,国家或地区性的土壤侵蚀学术讨论会也经常举行。这些交流方式,大大促

进了土壤侵蚀学科的发展,也促使了土壤侵蚀的研究不断与诸如环境学科等相关科学领域的渗透和融合。但是,就水力侵蚀与产沙领域的研究现状看,多是注重于试验统计分析、定性描述、线性模拟等,而对其过程的描述和模拟、力学机理的揭示等方面的研究显得相对较少,且不够深入。为此,本书从力学和能耗的概念出发,以降雨、径流力学规律的研究为切入点,侧重探讨了水力侵蚀产沙的力学机理及其过程,以及水力侵蚀产沙的基本规律,并在此基础上,研制开发了模拟水力侵蚀产沙过程的数学模型。无疑,这为丰富土壤侵蚀与产沙研究的科学内容,推动其进展都具有很大意义。尤其书中所提出的一些新观点新假设,将会有一定的启迪作用。

本书共分八章。第一章绪论,对土壤侵蚀与产沙的概念进行了论述,介绍了水力侵蚀产沙力学机理及过程的研究现状,以及水力侵蚀产沙过程及模拟研究的内容;第二章着重研究降雨力学特性及其侵蚀机理,包括雨滴的物理特性、水力特性(如雨滴落速)、降雨侵蚀力及降雨侵蚀机理;第三章研究了坡面流水力规律,包括坡面流的水力特性与基本方程、坡面流阻力规律的试验方法和坡面流水力规律分析;第四章对坡面流侵蚀产沙过程进行了研究,主要包括坡面流侵蚀产沙机理、坡面水力侵蚀产沙过程及其规律;第五章介绍了沟道侵蚀与输沙过程,包括沟道侵蚀的影响因素、沟道侵蚀机理、沟道侵蚀产沙过程的观测方法及预测、沟道高含沙水流及泥石流的输移过程;第六章至第八章,分别研究了坡面侵蚀产沙过程数学模型、小流域产流产沙数学模型和大中流域产流产沙数学模型,这些模型主要为动力学模型,同时,也有作者研制的统计类的模型。总之,本书试图比较科学、系统地论述水力侵蚀产沙过程及模拟的理论、方法和发展趋势,其中融入了作者近年来在水力侵蚀产沙领域取得的主要研究成果。同时,考虑到本书体系的完整性,也介绍了国内外有代表性的成果。作者对各位学者的研究成果深感钦佩,衷心感谢他们在此允许引用和评述他们的成果。

作者在研究过程中,曾得到了河海大学陈国祥教授、黄河水利科学研究院张胜利高级工程师(教授级)、曾茂林高级工程师(教授级),以及于不久前仙逝的河海大学金忠青教授等学者和专家的指导和帮助,在此,深表谢意,并对金忠青教授再次致以深切哀悼。

本书的研究内容和写作,历时多年,先后得到了不少同行前辈、专家和学者的帮助,也因此发现了一些值得修改和增删的地方。对此,向他们一并表示感谢。

此外,本书中的研究工作还得到了国家自然科学基金委员会和水利部联

合资助的国家自然科学基金重大项目的基金资助(项目编号:59890200)。

作者真诚期待着所有读到这本书的前辈、同行,对书中的不足给予批评指正,企盼在学术上能得以不断进步。

作者

2001 年 6 月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 土壤侵蚀与产沙.....	(1)
第二节 侵蚀产沙的模拟试验研究方法.....	(7)
第三节 水力侵蚀产沙力学机理及模拟的研究进展	(14)
第四节 水力侵蚀产沙过程及模拟研究的内容	(23)
第二章 降雨力学特性及其侵蚀机理	(29)
第一节 雨滴直径及其组成	(29)
第二节 雨滴落速	(33)
第三节 雨滴动能及降雨侵蚀力	(42)
第四节 降雨侵蚀机理	(46)
第三章 坡面流水力规律	(57)
第一节 坡面流水力规律研究现状及研究方法	(58)
第二节 坡面流的水力特性与基本方程	(63)
第三节 坡面流阻力规律的试验方法	(70)
第四节 坡面流水力规律分析	(74)
第四章 坡面流侵蚀产沙过程	(100)
第一节 坡面流侵蚀产沙机理.....	(100)
第二节 坡面流侵蚀产沙影响因素.....	(105)
第三节 坡面水力侵蚀产沙过程.....	(116)
第五章 沟道侵蚀与输沙过程	(131)
第一节 沟道类型及侵蚀形式.....	(131)
第二节 沟道侵蚀的影响因素.....	(137)
第三节 沟道侵蚀机理.....	(143)
第四节 沟道侵蚀产沙过程的观测方法及预测.....	(149)
第五节 沟道高含沙水流及泥石流的输移过程.....	(152)
第六章 坡面侵蚀产沙过程数学模拟	(168)
第一节 侵蚀产沙数学模型分类及研究综述.....	(168)

第二节	坡面产沙的数学模拟·····	(174)
第七章	小流域产流产沙数学模型·····	(188)
第一节	小流域产沙随机模型·····	(188)
第二节	小流域侵蚀产沙动力学模型·····	(192)
第八章	大中流域产流产沙数学模型·····	(208)
第一节	流域划分及模型结构·····	(208)
第二节	产流模型·····	(210)
第三节	产沙模型·····	(213)
第四节	参数率定及应用验证·····	(218)

第一章 绪 论

第一节 土壤侵蚀与产沙

土壤侵蚀与产沙是流域系统中两个既有密切联系又有一定区别的能量耗散过程。首先,两者的耗散功并非完全相同,其发生的力学机理也有所别;其次,只有当侵蚀发生后,产沙过程才有实际意义,因为侵蚀为产沙提供了能耗过程中物质流的来源,或者说侵蚀是产沙的必要条件。但是,在某些能耗过程中,两者又可以是同时发生的,具有相同的表现形式。例如,在坡面径流冲刷的机械功耗散过程中,侵蚀发生的同时,也伴着产沙的开始,其表现形式均为地表物质在径流作用下的迁移运动。因此,在某些情况下,虽然从物质运动形式的广义上讲,土壤侵蚀与产沙的概念是统一的,但从力学角度的狭义上来看,两者又总是有别的。区别土壤侵蚀与产沙的概念,不仅具有科学意义,也是开展流域治理等生产实践的需要。

一、土壤侵蚀

土壤侵蚀(Soil erosion;розия почв)一词,是在20世纪30年代由欧美传入中国的。由于不同学者出于对各自学科研究方向的偏重程度不同,对土壤侵蚀术语基本涵义的理解并非完全相同,几十年来常有争论。从地质学的角度而言,通常把“侵蚀”描述为地表风化引起的综合性形态变化现象。因而,有人就将土壤侵蚀视为土壤及岩石的破坏和地表形态塑造的整个过程,认为侵蚀不仅包括侵蚀物质的分散和移动,还应包括堆积。也有人把土壤侵蚀简单地视为一种纯粹的地质过程,而忽视了人类活动的作用过程。根据《辞海》^[1]所作的定义,土壤侵蚀是“土壤及其母质在水力、风力、重力、冻融等外营力作用下被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程。可分为水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀三大类”。由此可以看出,《辞海》中给出的定义考虑了引起土壤侵蚀的作用以及其他外力的作用,但仍属于“地质学的定义。”《中国水利百科全书》^[2]对“土壤侵蚀”所给出的基本定义与《辞海》中的基本相同,但将“土壤及其成土母质遭

受水力侵蚀的过程”称为“狭义的土壤侵蚀”，而将包括水力在内的所有外力引起的侵蚀过程称为“广义的土壤侵蚀”。C. K. Mutchler、C. E. Murphree、K. C. McGregor 等^[3]则把土壤侵蚀定义为土壤颗粒被雨滴溅散或被挟移，而不包括泥沙沉积和泥沙的输移。“土壤侵蚀”过程是否应当包括沉积，这并非是望文生义所要论及的问题，是由不同学科从其学科意义及实践意义出发而需要界定的问题。对于地质学来说，主要是研究地壳的性质、构造、成因和历史等科学问题，因此，把淤积作为塑造地表形态的侵蚀过程中的一个子过程也就成其必然了；而水土保持学科则关注的是地表物质的剥蚀、移动和流失，所以，对“土壤侵蚀”的理解更为强调的则是土壤的剥蚀和水土的流失。但不管怎样，土壤分散、剥蚀的力学机理与泥沙沉积的力学机理总是有别的。

近年来，中国一些水土保持专家广义上将土壤侵蚀理解为“水土流失”。水土流失一词，最早应用于中国黄土地区，主要指水力作用所造成的跑土、跑水、跑肥等地表物质的流失现象，其重要的内涵是认为“水土流失”是除土地表层被侵蚀外，还包括水的损失^[4]，如蒸腾、植物截留等。更通俗地讲，就是水和土“离开了原来的地块就算流失了”^[5,6]，也就是说侵蚀发生了。这一概念的最大科学意义在于从物质的运动过程确定了土壤侵蚀的涵义，更正了那种认为只要水土不进入大江大河的干支流就算没有流失的观点；其最大的实践意义在于明确了水利工程与水土保持工程的区别与作用。但无论如何，土壤侵蚀与水土流失在内涵上必定是不完全一样的。首先，引起土壤松散和剥离的作用并非只有水力一种，重力、风力等均会造成土壤结构的破坏和土壤颗粒及其他地表物质的流失；其次，土壤侵蚀不仅包括了土壤流失的现象，还包括了土壤结构的破坏和诸如雨滴的打击所造成的溅散等现象；最后，从泥沙运动学的角度而言，水土流失已经是一种产沙的过程。因而，随着水土保持科学的发展，水土流失的涵义已不断扩大，它包括了风力及人类活动所造成的侵蚀现象，并有了更为明确的意义。例如，从吴以敦在 20 世纪 80 年代关于“水土流失”中的“水”和“土”的概念的专门论述^[6]中即可以看到这一点。他认为，这里的“水”应为“降落地面的雨水及其所产生的径流可能造成水土流失的地表水”；这里的“土”是指“在所使用的土地上可能遭受水力或风力侵蚀的表层土壤或土粒和土块，而不是已经进入水流受其挟运的土”。进而定义“水土流失”为“所使用的土地表面土粒和土块遭受降雨及地表水侵蚀成为被水挟带的泥沙而流失掉(或者由风力作用而侵蚀掉)”。

实际上，从能量的观点来说，土壤侵蚀就是地表物质系统在内外营力的能量输入或输出时所引起的一种失衡现象，引起这种失衡现象的内外营力又称

侵蚀营力。换句话说,土壤侵蚀就是地表物质(包括成土母质)在侵蚀营力作用下所发生的分散及相对初始位置的移动。侵蚀外营力,主要有水力(包括雨滴击溅力)、风力、人为作用力、生物作用力等;侵蚀内营力,主要指重力和地质构造力。从能耗的角度来看,引起侵蚀的能量有水力机械能、化学能、生物能、势能、风力机械能、人为机械能等。不同类型的能量所造成的侵蚀形式、形成侵蚀的力学机理是不一样的,如雨滴的打击机械能可以引起土壤颗粒的溅散,生物能可以使土体整体性遭受破坏,势能可以引起土体的崩落等。

由水力机械能所引起的水力侵蚀是很多地区,尤其是中国黄土地区的一种主要侵蚀形式。水力侵蚀是由降雨及径流所形成的地表物质的分散及移动的过程,或者从系统的观点来讲,水力侵蚀是以降雨作为输入或激励变量,以径流和泥沙作为输出或状态变量的一个能量耗散过程。在这整个过程中,侵蚀物质的输移和产出始终是以水力侵蚀能量的流动为纽带的。同时,侵蚀方式和侵蚀形态主要取决于水动力条件,如在流域的坡顶范围内,侵蚀动力主要为雨滴对地表的撞击力,其侵蚀方式以击溅为主,侵蚀形态主要表现为土壤颗粒的溅散或雨滴斑痕,以及由薄层状水流将溅散物质输往坡下所造成的面状侵蚀;从坡顶向下一段距离后,随着径流的不断汇集,径流量增加,流速增大,侵蚀动力则主要为径流对地表的剪切力,侵蚀方式主要是细沟侵蚀,侵蚀形态主要是线状细沟……

一般来说,在没有(或有一定限度的)人类活动参与的情况下,自然外营力引起的地表物质的侵蚀过程是极其缓慢的,这样的侵蚀称为自然侵蚀,也称正常侵蚀或地质侵蚀,即土壤、母质、风化物、岩屑等地表物质在自然外营力作用下发生破坏、分离和转运的过程。另一种侵蚀过程是加速侵蚀,又称人类活动影响侵蚀,是指在自然侵蚀的基础上,叠加了人为作用后的侵蚀,亦即由人类不当的各种活动如滥伐森林、过度放牧等而引起的一种破坏性侵蚀现象。自然侵蚀与人为作用的叠加结果决非线性效应。人为作用所造成的加速侵蚀,可以比自然侵蚀要严重得多。例如,据有关资料计算,现代黄土高原土壤侵蚀率(包括自然侵蚀和加速侵蚀)相当于更新世以来平均堆积速率的 39 倍。在 1 年内,甚至 1 天之内,加速侵蚀的土壤流失量可以相当于正常阶段几十年的流失量。再如,根据姚文艺等人的调查分析^[7],1950~1985 年无定河流域开荒 1 631.6 km²,增加土壤流失量达 1.71 亿 t。

表征土壤侵蚀程度的指标常用土壤侵蚀模数或侵蚀厚度来表示。所谓侵蚀模数,是指在单位时间、单位面积内遭受侵蚀的土壤数量,其单位一般为 t/(km²·a);侵蚀厚度一般用每 100mm 径流深侵蚀掉的土层厚度来反映,这种

表示方法仅能反映在特定条件下所产生的侵蚀量,而并不代表真实的侵蚀量,取用 100mm 的径流深只是作为一个对比标准而已。另外,也有用流域面积上的年平均土壤侵蚀深度来反映土壤侵蚀量大小的。目前,在实际确定土壤侵蚀量的大小时,通常以土壤侵蚀程度作为判别指标。所谓侵蚀程度,是指相对侵蚀背景因子条件下的土壤侵蚀的严重程度,其表示方法是以土壤侵蚀模数作为主要指标,同时又以环境因子(包括植被覆盖度、坡度、土地类型、岩石裸露情况等)作为参考性指标,综合划分侵蚀级别,即侵蚀程度。因为,对于诸如土石山区或砒砂岩地区,尽管相对黄土丘陵沟壑区等类型区来说,侵蚀模数可能不大,但由于前者的土壤覆盖层往往很薄,侵蚀所造成的危害却是很大的,就是说,侵蚀程度是很高的。因此,在生产实践中判断某一流域或地区的侵蚀程度,不能以侵蚀模数作为惟一指标。

总之,土壤侵蚀是一种复杂的自然现象,引起侵蚀的力不同,其侵蚀机理及其力学过程是不同的,所形成的侵蚀类型亦会有异。对于不同的自然地理区域,侵蚀类型及侵蚀量相同,但侵蚀危害程度却可能相差甚大。

二、流域产沙

流域产沙,是指某一流域或某一集水区内的侵蚀物质向其出口断面的有效输移的过程。移动到出口断面的侵蚀物质的数量,称之为产沙量。这里的关键是“有效输移”,而不包括诸如雨滴使土壤颗粒朝坡上方的击溅和分散等。也就是说,有侵蚀发生,不一定就伴有产沙,但流域产沙归根结底来自于流域内的土壤侵蚀。所以,有产沙,必伴有侵蚀,侵蚀是产沙的前提。

使侵蚀物质有效移动的力,如果是径流引起的,则称之为水力产沙;如果是风引起的,则称之为风力产沙。人类活动也可造成产沙,如开矿、修路等直接向沟道内倾倒矿渣、土体等。引起产沙的力不同,泥沙运动的形式和规律是不同的。

由于侵蚀物质在输移过程中不可避免地有沉积发生,因此,在有限的某一时段内,并不是全部土壤侵蚀量都能汇集到集水区的出口断面。一般情况下,侵蚀量与产沙量是不相等的,产沙量可能只是侵蚀量的一部分。也就是说,在以侵蚀物质移动作为侵蚀能量做功特征的能耗过程中,物质的流动是不平衡的。

汇集到集水区某一断面或流域出口断面的侵蚀量,又称输沙量。在一定的侵蚀量条件下,输沙量越多,说明流域的产沙强度越高。为表征流域的产沙强度,定义流域产沙量(或输沙量)与侵蚀量之比为泥沙输移比,用 DR 表示,

即

$$DR = \frac{Y}{W_e} \quad (1-1)$$

式中: Y 为流域产沙量(或输沙量), 一般用产沙模数或输沙模数 $[t/(km^2 \cdot a)]$ 表示; W_e 为侵蚀量, 用侵蚀模数 $[t/(km^2 \cdot a)]$ 表示。

由式(1-1)可知, $DR \leq 1$; 泥沙输移比越大, 表明水流输沙能力越强。

我国对泥沙输移比的研究最早始于黄河流域。20 世纪五六十年代有人认为, 黄河流域侵蚀量是河道输沙量的 2~3 倍; 后来又有人认为, 侵蚀量较河道输沙量大 30%~40%。20 世纪 70 年代以来, 龚时旻等^① 研究认为, 在黄河泥沙主要来源区的河口镇至龙门区间的黄土丘陵沟壑区, 土壤侵蚀 1t, 进入黄河的泥沙也大致为 1t, 即泥沙输移比接近 1。

牟金泽和孟庆枚^②1980 年运用 B·A·拜格诺—王尚毅的“自动悬浮”理论, 在分析了无定河支流大理河的泥沙输移特点后证明, 该流域在绝大多数洪水的输沙量中, 冲泻物质数量几乎均占总输沙量的 95% 以上, 因此, 这类流域的泥沙输移比就显得特别高。由此, 也证明了黄河中游黄土丘陵沟壑区中小流域泥沙输移比接近于 1。

在 20 世纪 80 年代末, 景可等^[8] 在前人研究的基础上, 对黄河流域黄土地区的泥沙输移比开展了进一步研究, 认为黄土高原绝大部分地区泥沙输移比接近于 1, 只有渭河下游、河套谷地、汾河的中下游, 以及晋西北宽谷区的泥沙略有沉积。

也有人认为, 从国外及长江流域的研究结果看, 泥沙输移比远远小于 1, 黄土高原泥沙输移比是不可能接近于 1 的。其实, 泥沙输移比的大小是因空间和时段而变的, 不同流域有其不同的泥沙输移比。这是因为在不同的流域, 其水文、水力及下垫面条件是有差异的。就是对于一定的流域, 从多年平均情况看, 泥沙输移比可能是一个比较稳定的值, 但系列较短时, 其值也是不稳定的。另外, 即使同一流域同一河道, 观测断面不同, 输移比大小也不同。例如, 计算表明, 窟野河神木以上河道多年平均泥沙输移比接近于 1, 而温家川附近的泥沙输移比则小于 1; 秃尾河高家堡以上河道多年泥沙输移比小于 1, 而高家川附近则接近于 1。类似这种情况的还有北洛河、汾河等。一般来说, 流域面积越小, 侵蚀、产沙环境因子的区域性差异越小, 泥沙输移比就相对稳定; 流域面积越大, 侵蚀、产沙环境因子差异越大, 流域内不同区域的泥沙输移比也

① 龚时旻, 熊贵枢. 黄河泥沙的来源和输移. 第一次河流泥沙国际学术讲座会论文集, 1998

② 牟金泽, 孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比. 黄河水利科学研究所, 1980

就相差越远,如黄河、长江等。因此,不能笼统地不分流域或区域、不分时段而谈及泥沙输移比的大小。景可等^[8]认为,应以两个水文系统年为时间系列,以中小流域或者侵蚀地貌发育阶段相似的流域为空间范围作为确定泥沙输移比的标准,并定义泥沙输移比为:一定时间和空间范围内,流域某过水断面输出小于某一粒级的泥沙与该断面以上流域侵蚀的同粒径泥沙量之比。但如何确定这些标准或条件使其更为合适,有待深入研究。

泥沙输移比的大小受流域内地貌、环境和人类活动等因素的影响,例如沙源的种类、范围和位置;地形和地面特征,流域形状和河道条件;径流特征;植被;土地利用;土壤结构、侵蚀物质的粗细等。

一般来说,地质构造拗陷区都属于泥沙堆积环境,处于此区内的河流,则属于淤积性的,泥沙输移比就小于1。反之,在构造抬升区发育的河流都属于侵蚀性河流,河道以冲刷为主,处于此区内的河流泥沙输移比接近于1。

地质构造性质对泥沙输移比的影响,又是通过地貌形态表现出来的。构造抬升区发育的河谷一般说来纵比降大,具有较高的势能,水流输移泥沙能力强,侵蚀物质就容易被输移;相反,构造拗陷区内发育的河流,泥沙就不易被输送,输移比就低。

国内外不少学者认为,泥沙输移比是随流域面积增大而迅速递减的,如国外有人认为,泥沙输移比随流域面积的 $-1/8$ 次幂而变化;1979年,罗宾逊认为,泥沙输移比与流域面积的0.2次幂成反比;牟金泽、尹国康等也认为,这种反比关系确实存在。如牟金泽等^①提出的泥沙输移比计算式为

$$DR = 1.29 + 1.37R_c - 0.025\ln A \quad (1-2)$$

式中: R_c 为沟道密度, km/km^2 ; A 为流域面积, km^2 。

关于径流因素对泥沙输移比的影响,有不同的认识。有人认为,泥沙输移比只是流域地貌系统特征值的函数,与水流条件关系不大或无关;有人则认为,径流是影响泥沙输移比的主要因素。前者强调流域地貌系统特征(如沟壑密度、沟床比降等)正是径流塑造的结果,在长时期内,流域的地貌变化(如侵蚀、沉积等)规律总是与流域的水文、气象条件相适应的,因此从统计观点讲,流域地貌系统特征值对泥沙输移比的影响,要比径流特征值显著得多;后者则强调径流是流域侵蚀和侵蚀物质运动的主要动力因素,由于侵蚀和侵蚀物质输移的力学机理并非完全相同,所以径流必然成为影响泥沙输移比的重要因素。如果形成径流的降雨强度大、历时长,洪峰流量也大,水流挟沙能力就大,

① 牟金泽,孟庆枚.论流域产沙量计算中的泥沙输移比.黄河水利科学研究所,1980

则泥沙输移比就高,输沙量与侵蚀量就较接近;反之,泥沙输移比就小。

影响泥沙输移比大小的侵蚀物质特征主要是级配及容重。侵蚀物质粒径越小,容重越低,就越容易被水流所挟带,输移比就越高;反之,就易发生淤积,输移比则越低。

泥沙输移比是土壤侵蚀和产沙双重因子的函数,人类活动对其中任何一个因子的改变都会引起输移比的变化,即使两个因子都受到人类活动的影响,但这种影响也不可能是平衡的,输移比仍会发生变化。例如,开矿、修路等人类活动,会使侵蚀量增加;同时,由于开矿等会使泥沙颗粒变粗,容重增大,推移质增多,这样,又会造成大量粗沙落淤在床面上,使床面糙率增大,比降变缓,从而导致泥沙输移比减小。

估算泥沙输移比时,流域侵蚀量应当包括全流域的侵蚀总量。如输沙观测断面在流域出口,流域侵蚀量等于坡面、沟坡、沟床直至沟口的侵蚀量之和;如果输沙观测断面是选在河道的某一处,则断面以上流域的侵蚀量除上述各项外,还应加上断面以上的河道侵蚀量。根据泥沙输移比的定义,在计算一次降雨的泥沙输移比时,其侵蚀量应为本次降雨的侵蚀量。也就是说,侵蚀量与产沙量应是同一时段内的,估算泥沙输移比应当考虑时间尺度和空间范围。

第二节 侵蚀产沙的模拟试验研究方法

一、模拟试验的基本原则

为了达到认识土壤侵蚀机制和泥沙输移规律的目的,必须借助于试验研究。也就是通过大量的观测,进行定性和定量的分析,从不断演化的侵蚀过程中发现其规律性,形成理论(或反过来检验一种假设的理论),建立模型,对侵蚀与产沙进行预测,或对各种侵蚀现象进行理论解释。

一般来说,一种试验至少能够控制一个因子,通过逐步试验并了解其在研究对象的变化过程中所起的作用。就土壤侵蚀的研究来说,应在野外或试验室内,全部或部分模拟侵蚀现象,试验者至少能够控制一个重要的侵蚀因子,以便使该因子在总的侵蚀现象中所起的作用得到检验。对一个试验的评价,首先应视其能否全部或部分模拟自然界的现象和程度,所获得的试验结果是否与自然过程的结构相当,能否提供精确、可靠的资料。这就要求试验者对边界条件要给予足够的重视。为了了解各种侵蚀因子的作用,一般有必要进行重复试验,所建立的试验设置应能满足同一试验者或不同试验者均能进行重

复试验。同时,试验者所设计的试验设置,必须与预期的目的和所能达到的结果相联系。

土壤侵蚀试验有野外的也有室内的。试验过程可以在天然条件下进行,也可以人工模拟。利用天然条件进行试验,往往要受到时间和地域等条件的限制,给试验者带来极大的困难;人工模拟,可以不受时间和空间的限制,可以重复天然降雨,短时期内重复试验,缩短试验周期。前者试验是一种“纯”自然的过程;后者试验是一种带有干扰的或简化的过程,在模拟试验的结果中不可避免地会增加误差的因素。

二、侵蚀与产沙的模拟试验发展概况

侵蚀与产沙的模拟试验,是地貌试验研究的一个重要的分支。最早的流水剥蚀试验是法国学者 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,大多利用模拟降雨的方法进行,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·拉尔等学者^[3]^①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^[9]。1932 年美国的 Duley D. Hbys 开展的侵蚀试验小区面积为 $1.5\text{m} \times 0.85\text{m}$ 。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(Zingg)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^[10]研究了雨滴大小、滴谱、雨滴终速以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

① 李占斌:黄土地区坡地系统暴雨侵蚀试验及小流域产沙问题模型研究,陕西机械学院博士论文,1991

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 年在试验室通过人工降雨,用玻璃球作为无粘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。在试验室内模拟坡面径流冲刷的还有肯里根(1944 年)、伊泽德(1944 年)、帕森斯(1949 年)、吴和布拉特(1962 年)、尤恩和温单尔(1971 年)等。20 世纪 70 年代,沈学文等曾在试验室水槽内,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 0.35mm 的土粒的办法,进行了地表径流引起的土壤侵蚀试验。在 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。在 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。

在中国,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委员会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^[11]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。