

国家自然科学基金资助项目

流域坡面与沟道的 侵蚀产沙研究

陈浩 等著



气象出版社

56.374
283

国家自然科学基金青年基金资助项目

流域坡面与沟道的 侵蚀产沙研究

陈 浩 等著

气象出版社

00539

(京) 新登字046号

内 容 简 介

本书以黄土高原丘陵沟壑区的侵蚀环境为背景、以沟道小流域为侵蚀地貌的基本单元,利用野外观测资料、人工模拟降雨试验、遥感信息系统相结合的分析方法,系统地研究了流域系统中坡面的降雨特征、入渗、产流、侵蚀、产沙的动态过程和相互的定量对应关系;坡地(坡面与沟道)水沙运移特征和汇流与侵蚀产沙的动态特征及演化关系;区域流域沟谷系统与侵蚀产沙和泥沙输移规律。旨在深入探讨和揭示流域系统的侵蚀产沙机理,为水土保持实践提供了科学依据。

本书可供地理、水土保持、水利、生态和环境等方面专业科研、规划设计人员和有关大专院校师生参考。

流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究

陈 浩 等著

责任编辑 潘根娣

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

中国科学技术信息研究所印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.625 字数: 210千字

1993年12月第一版 1993年12月第一次印刷

印数: 1—500 定价: 7.00元

ISBN 7-5029-1431-5/P·0613

前 言

水土资源是人类赖以生存的物质基础，在自然和人类活动影响下，世界各地水土资源正在受到不同程度的破坏。因此，全球范围的水土流失问题已引起各国有关部门的极大关注。

在我国，黄土高原的水土流失问题举世瞩目。水土流失不仅给当地农业生产和人民生活带来严重的影响，而且黄土高原来的泥沙是黄河下游河患的主要根源。

长期以来，黄土高原人民和有关部门的科技工作者为揭示水土流失规律和防治措施进行了艰苦不懈的努力，已产生明显效果。但是，对于包括水蚀在内的各种侵蚀力作用下的土壤侵蚀规律、侵蚀产沙机理还需要进行深入分析和探讨，仍是人们继续奋斗的目标。

沟道流域是黄土高原泥沙的主要产源区和相对完整的降雨径流、侵蚀产沙系统。以单元小流域的产沙研究作为区域流域地貌系统产沙研究的突破口，典型小流域的汇流与产沙，泥沙来源、坡面与沟道的侵蚀演化、侵蚀产沙关系的研究在地貌发育理论和水土保持实践上有着十分重要的意义。

本书为国家自然科学基金资助的项目，除已用论文形式单独发表的之外，本书记述了近年来此项研究的主要成果。在同志们的帮助下有些内容已超出项目申报时的研究内容。本书具有以下特色：

(1) 将降雨溅蚀、径流冲刷与坡面土壤结构的变化相

对应，定量地描叙了在降雨作用下入渗、产流和侵蚀、产沙的同步动态过程，确定了它们之间的对应关系，探讨了降雨与径流的交互作用。

（2）分析了流域地貌系统中坡面至沟道的汇流与产沙的动态过程和表现特征，沟谷系统侵蚀与产沙的关系。

（3）研究了坡面与沟道侵蚀演化的关系和动态过程，确定了不同地貌部位的泥沙来源和泥沙产生的根源，坡地含沙水流的侵蚀、输移、沉积的特征。

本书是集体研究的成果，第一章由景可、李凤新执笔；第二章由陈洪经执笔；第三、四、五、六章由陈浩执笔；第七章由蔡强国、吴淑安、马绍嘉执笔；第八章由金德生、郭庆伍执笔。

青年基金申请过程中得到龚国元、刘昌明、陈永宗、尤联元研究员的热情推荐。在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，本书不妥之处恳请读者指正。

陈 浩

1993年3月

目 录

前言

第一章 流域侵蚀与地理环境	(1)
一、概述.....	(1)
二、侵蚀与环境的关系.....	(5)
三、侵蚀与产沙的关系.....	(22)
第二章 坡面与沟道的基本形态及演化特征	(32)
一、概述.....	(32)
二、研究区概况.....	(33)
三、坡面与沟道的形态特征及其动态变化.....	(36)
四、地表形态的变化趋势.....	(50)
第三章 坡面与沟道的汇流特征	(59)
一、概述.....	(59)
二、坡面产流过程.....	(61)
三、汇流过程.....	(75)
第四章 坡面侵蚀产沙	(93)
一、概述.....	(93)
二、坡面产沙的过程.....	(95)
三、坡面侵蚀的主要方式.....	(100)
第五章 坡面与沟道的侵蚀产沙关系	(134)
一、概述.....	(134)
二、侵蚀类型.....	(135)

三、降雨特征、坡面来水来沙与沟坡侵蚀产沙的关系.....	(139)
四、坡地侵蚀产沙垂直分带性及其水沙运移特征.....	(157)
五、坡面来水在沟坡产沙中的作用.....	(166)
六、坡面与沟道侵蚀产沙的耦合关系.....	(173)
第六章 沟谷系统与侵蚀产沙.....	(180)
一、概述.....	(180)
二、沟谷系统.....	(181)
三、沟谷密度.....	(200)
四、沟谷系统的汇流与产沙.....	(211)
第七章 沟道流域泥沙输移比计算与输沙规律.....	(225)
一、概述.....	(225)
二、泥沙输移比随时间的变化和分布规律.....	(227)
三、影响因素分析与计算.....	(234)
四、不同沟道发育阶段重力侵蚀对泥沙输移的影响.....	(242)
第八章 流域侵蚀产沙及地貌发育过程实验研究.....	(251)
一、概述.....	(251)
二、模型理论基础、实验设计及条件.....	(254)
三、侵蚀产沙过程实验分析.....	(260)
四、流域地貌发育过程实验分析.....	(280)
五、结果与讨论.....	(297)

第一章 流域侵蚀与地理环境

一、概 述

(一) 侵蚀的涵义

随着工业高速发展，人口的急剧增加，人们向自然界索取越来越多，越来越严酷，特别在发展中国家这一现象格外突出。由此引起众多的环境问题，土壤侵蚀就是其中的环境问题之一。由于土壤侵蚀的产生，从而引发出一系列与此相关的其他环境问题。本世纪20年代发达的资本主义国家美国就把侵蚀看作是一个严重的农业问题。自此土壤侵蚀一词得到广泛运用，但随着经济发展，土壤侵蚀一词有了更为广泛的意义，已不是专指土壤侵蚀了，而扩大到所有成土母质的侵蚀。本文所指的侵蚀是指后者。侵蚀一词首先是由地质学家提出，后来土壤学家借助这一词描述土壤的流失谓之土壤侵蚀。土壤侵蚀以往专指经过生物作用、有过成土过程的地表物质的流失。而地貌学家所指的侵蚀是相对于沉积而言，是包括土壤在内的各种母质的流失。而现在无论是地貌学家，还是土壤学家所指的土壤侵蚀都是包括母质在内的所有地表物质的侵蚀。

侵蚀一词的内涵目前有两种理解；在原苏联和东欧各国及我国的文献中是指水体对土壤和岩石的破坏过程。这个过程不仅指水体、雨滴对固体物质的直接机械破坏和水体沿河

床运动的冲刷，还包括水流对物质的搬运输移，最终堆积，又称之为侵蚀过程^{〔1〕〔2〕}。大不列颠百科全书（1980年）把侵蚀解释为“破坏和塑造地表特征的全部过程”并把风化作用也包括在侵蚀条目之中。前者混淆了侵蚀与沉积之间的关系。侵蚀与沉积并不是同义词，而是反义词。侵蚀与堆积是两个完全不同的过程，例如黄土高原无论是沟谷侵蚀，还是坡面侵蚀，侵蚀物质大部分都输入黄河，在下游与滨海沉积。很显然不能把下游的沉积过程纳入侵蚀过程；同样泥沙的搬运过程也不能纳入侵蚀。侵蚀、搬运、堆积是分属泥沙系统中的三个子系统，它们之间有相互关系，而且是统一体中的三个不同组成部分。后者混淆了侵蚀与风化的关系，风化是一个物理过程，是指物质本身的物理性质的变化过程，同时有地表形态演化的原则错误；地球陆地表面形态成因是十分复杂的，是不同营力、不同方式塑造，并不是统统都是侵蚀塑造。

V.A.范诺尼的侵蚀定义是在水和风的作用下，岩石颗粒的移动^{〔3〕}；W.G.莫尔认为侵蚀是自然动力对地表的损毁过程^{〔4〕}；土壤侵蚀学家哈德逊认为，侵蚀是一种夷平过程，侵蚀使土壤和岩石颗粒在重力作用下发生转移、流动或流失^{〔5〕}。陈永宗在综合各家侵蚀定义的基础上提出了自己对侵蚀的理解；他认为侵蚀的确切涵义是指：地表物质（岩石和土壤）在外营力作用下的分离、破坏和移动；这里所说的外营力包括各自然营力（如水、风、重力等）和人为作用^{〔6〕}。

（二）自然侵蚀和加速侵蚀

自然侵蚀又称地质侵蚀，或正常侵蚀，它是指在不受人

为影响条件下自然营力对地表物质的作用下的分离、破坏和移动。自然侵蚀是一种极为普遍的自然现象，在地球陆地表面除沉积区外的任何地区或多或少地存在侵蚀，只是在不同的生物气候带和地质构造带侵蚀的速率不相同而已。一般在半干旱地带侵蚀强，而在湿润地带侵蚀微弱。

加速侵蚀是专指在人类不合理作用下超过自然侵蚀速度的侵蚀。严格地说加速侵蚀有自然加速和人为加速；不过自然加速一般速度较慢，不太为人们注意。人为加速侵蚀是在自然侵蚀的基础上，由于人类不合理活动促使地面的抗蚀力减弱，而引起的侵蚀增强。人为加速侵蚀是当今世界上普遍关注的环境问题。

（三）地理环境涵义认识

环境是指周围的情况，地理环境是指周围的地理情况。地理环境包括自然地理环境和人文地理环境两大组成部分。自然地理环境以往又称自然景观，它包括作为生产资料和劳动对象的各种自然条件的总和，这些条件是大气圈、生物圈、水圈、地壳圈。这些条件是人类生活、社会生存和发展的自然基础，对社会的发展尽管无决定性作用，但可以加速或减缓其过程。自然地理环境为一个开放系统，是地球气相、固相、液相三种物质的交界面，是有机界和无机界互相转化的中心场所，又是人类活动空间。

人文环境是加速或缓解土壤侵蚀的决定性因素，它是指融于自然环境系统的人类文化过程的物质景观和部分精神景观。人为环境主要包括人口、聚落、土地利用的形式和结构、交通、矿区、经济政策、社会制度等凡属经济地理研究范畴的一切内容。上述的自然地理环境与人文环境融为一体为地理

环境，正如系统论的基本结论一样，部分环境与整体环境的关系决不是一个简单的线性关系，而体现出来的是在地理过程中一系列具有耗散特性的物质循环和能量流动的非线性关系。土壤侵蚀过程是地理环境系统中的一系列环境——动力过程。

（四）侵蚀与环境关系的几点认识

这里所论述的环境就是上文论述的地理环境，它既包括自然环境，也包括社会环境；而这里的侵蚀也泛指自然侵蚀和人为加速侵蚀；目前有害侵蚀属于何种侵蚀，是自然侵蚀，还是人为加速侵蚀，各家看法分歧颇大；以黄土高原的现代侵蚀为例说明侵蚀与环境的关系。概括起来，侵蚀与环境的关系至今有三种基本观点：其一，部分地质学家认为黄土高原的现代侵蚀取决于地质环境，侵蚀的时间变化取决于太阳黑子活动周期；他们认为黄土高原侵蚀自古以来就是如此，主要原因是地质环境决定侵蚀，人类不合理活动对侵蚀的加速不起作用^[7]。其二，部分历史地理学家和生态学家，乃至部分地理学家他们认为黄土高原的有害侵蚀是由社会环境形成；即由于人类活动强度超过自然承载能力，破坏了植被使地面失去覆盖，从而引起强烈的水蚀与风蚀^[8]；在他们看来黄土高原侵蚀历史仅有二千多年。其三，是介于上述二者之间的中立看法：认为黄土高原的侵蚀由来以久，可以追溯到地质时期，但是进入人类历史时期随着人类活动强度的增加，侵蚀也随之发展；并认为侵蚀量的时空分布的基本规律是：侵蚀量的空间分布是受自然地理带控制，侵蚀量的时间分布有人类活动以来是受人文环境制约^[9]。

由上述三种不同看法中可以认识到自然界的侵蚀是严格

地受到环境因素的制约；因而只有综合分析环境因素，才能正确地认识侵蚀的时空变化与地理环境的关系。

二、侵蚀与环境的关系

（一）影响侵蚀的主要环境因素

侵蚀过程是地理环境中的一种普遍存在的自然现象；它的存在是地理环境各组成要素相互作用，相互制约的结果；作用与制约侵蚀的主要因素有气候因素、植被因素、形态因素、地表物质因素、人为因素等五大影响因素：

1. 气候因素

影响侵蚀的气候因素的因子比较多，如降水、温度、干湿度、风等因子；这些因子有的是直接作用，如降水、风，有的是间接影响如温度、干湿度等；本文主要论述直接因子中的降水对侵蚀的影响。

降水是主要的侵蚀力，对侵蚀的影响主要表现在两方面：第一降水雨滴对地面的击溅作用。所谓雨滴的击溅作用就是雨滴对地面的打击作用。雨滴击溅地面的作用大小取决于降雨强度。降雨强度是判别降雨侵蚀力的最重要的指标。因为降雨强度与其动能成正比。多数学者都建立起不同的降雨动力与雨强的关系式：(10、11、12)

$$E = 1.213 + 0.891gI$$

$$E = 23.49I^{0.27}$$

$$E = 29.64I^{0.29}$$

式中 E ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$) 动能、 I (mm/h) 雨强。天然降雨的雨滴直径大小取决于雨型。对于一种雨型来讲，雨滴大小组成是

随雨强增大而增大。雨滴直径越大，它对地面的打击力越强。

第二、降水对地面侵蚀表现在降水径流对地表的冲刷力，当单位时间内的降水量达得一定量，并超过土壤的渗透能力时就会产流，或者降水强度太大，尽管土层中水分未达到饱和，地表也产流，这就是所谓的超渗产流。黄土高原的径流形式主要是超渗产流。径流对侵蚀的影响其主要表现为径流对地表的片状侵蚀和沟状侵蚀；当土壤含水量达到饱和或者超渗产流时，地表产生片状流；片状流产生对地表侵蚀力量很小，只是片状流产生以后一方面受到地形的约束，片状流向长形集中改变片流的层流性质转为紊流；另一面片流在雨滴的扰动时也是原来的层流转变为紊流，于是侵蚀开始。一般层流水流对地表侵蚀不很明显，只有当流速增加（大约超过 30cm/s ），径流成为紊流时，产生细沟或浅沟侵蚀；当坡度增加，或雨强增加、或者地表蓄水过多使水力梯度增加都能使径流成为紊流，加速水力对地表的侵蚀。

2. 地表组成物质

土壤抗御降水的侵蚀能力，在植被条件一定的情况下，主要取决于地表组成物的特性，相似降水侵蚀力作用于不同物质，将产生完全不同的侵蚀效果；因此，土壤的特性尤其是土壤的机械组成，土壤的物理化学特性对侵蚀的影响很大：

（1）土壤的机械组成与侵蚀 为了估计土壤颗粒大小的重要性，把不同粒径颗粒的土壤分布标绘在三角图上^{〔10〕}

（图1-1）。在图1-1上一般认为易蚀性土壤粘粒含量有限，3—35%之间，粘粒含量超过30—35%的土壤凝聚力较大，并形成稳定的土壤团粒结构。土壤的机械组成还关系到土壤的其他特性，如透水性、孔隙率、土壤的剖面结构等。一般砂性

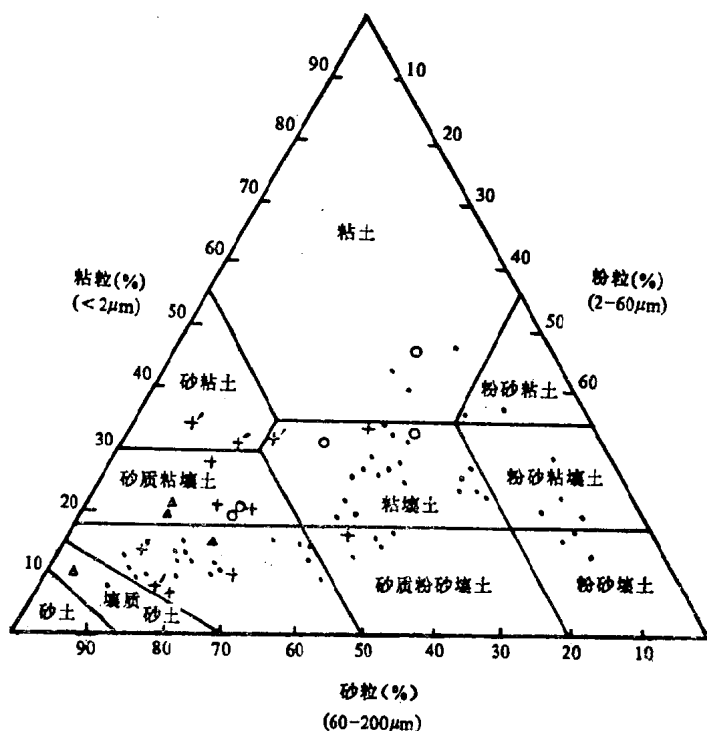


图1-1 易蚀土壤的粒径分布^[13]

(土壤A层颗粒大小规定: · 英国, ○ 加拿大, △ 印度,
+ 美国, +′ 粉粒粒级2—20 μ m)

土粒较粗, 土壤的孔隙率高及透水性能较好, 不易形成地表径流, 不易被流水冲刷或遭受雨滴击溅, 所以侵蚀相应减弱。相反土壤组成物粒级较细, 如以粘粒为主, 那么土壤成为块状结构, 于是土壤的透水性就差, 虽然易形成地表径流, 但由于抗蚀能力强, 也不易产生地表侵蚀。只有介于砂土与粘土之间的中壤土最容易遭受侵蚀。

(2) 土壤的物理、化学特性 在土壤的机械组成一定的情况下,土壤的有机质含量、胶体矿物,土壤矿物的接触关系都是影响土壤侵蚀的重要因子;如土壤的有机质含量高,质地疏松有良好的团粒结构,那么透水性强,就不易产生或产生较小的地表径流。反之透水性较低,就容易产生较大的径流冲刷。同时腐殖质能够胶结土粒,这样物质胶结以后在水中就不易再分散,或分散性很小,抗蚀性较大,土壤就不易侵蚀。

3. 植被因子

植物被覆是自然因素中对阻止侵蚀起积极作用的因子,几乎在任何条件下都有阻缓水蚀、风蚀的作用。在良好的草地和林地上,径流与侵蚀都较小;通常情况下径流和侵蚀量分别不足裸地的5%和1%(表1-1)。植被防止侵蚀的功能

表1-1 黄河中游黄龙山有林与无林流域侵蚀量比较

(单位: t/km^2)⁽⁶⁾

植 被	年 代 流 域 名 称	1960	1961	1962	1963	1964
有 林	寺 沟	164.3	39.1	21.99	(8.14)	16.83
	背崖枝沟	1091.0	9.60			
无 林	南 沟					1744.0
	安民沟		937.5			

续表

植 被	年 代 流 域 名 称	1965	1966	1967	1960— 1967 平均	1961— 1967 平均
有 林	寺 沟 背崖枝沟	552.7	6.60	2.58	101.53	144.88
无 林	南 沟 安民沟	24.98	1031.0	131.0		732.75

表现是多方面的;首先是减轻雨滴击溅力,当雨滴落到植物叶面上时,雨滴能量被分散不能直接打击地表;在植物较好的地面上有一层枯枝落叶层,它劫持了穿过植物冠层落下来的雨滴,使进入土壤的水保持干净;植物的叶子和根系增加地面粗糙率,可以滞缓径流,降低流速,减轻径流对地面的冲刷。

当地表植被盖度小于70%以后,径流和侵蚀迅速地增加,当植被盖度低于30%时,植被对防止侵蚀已经起不到多大作用(图1-2)。在半干旱地区植被盖度往往低于20—30%,所以土壤侵蚀强烈。

4. 地形因素

地形是影响土壤侵蚀的重要因子之一,一般在平地上土壤侵蚀是不显著的,土壤侵蚀多半发生在有一定倾斜的地面上。影响土壤侵蚀的地形因子比较多,如地形坡度、坡长、坡形、坡向、相对高差、沟谷密度等都是影响土壤侵蚀的重要

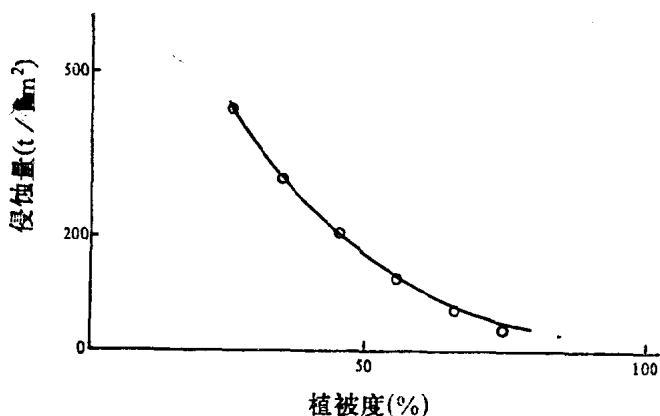


图1-2 植被盖度与侵蚀量的关系^[6]

因素；下面简述主要地形因子：

(1) 坡度 地面坡度是决定径流冲刷能力的基本因素之一；径流所具有的能量是径流的质量和流速的函数；而流速的大小主要决定于径流深度与地面的坡度。因此坡度直接影响径流的冲刷能力；在其他条件相同或相似时，一般地面

表1-2 绥德水保站不同坡度的坡耕地上水土流失量比较

地面坡度	年平均流失量 (1954—1960)		一次流失量 (1958年8月8日)	
	水(m³/亩)	土(t/亩)	水(m³/亩)	土(t/亩)
14°	17.8	2.56	11.4	6.8
21°	23.2	4.04	13.7	8.0
28°	16.8	6.79	26	14.4