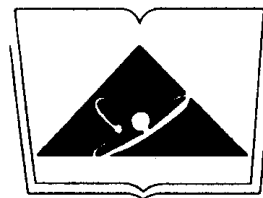
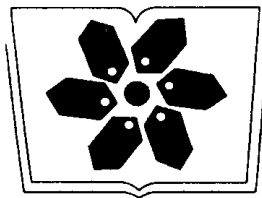


# 黄土高原小流域 侵蚀产沙过程与模拟

■ 蔡强国 王贵平 陈永宗 著

7.1

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版 国家自然科学基金委员会资助出版

# 黄土高原小流域 侵蚀产沙过程与模拟

蔡强国 王贵平 陈永宗 著

科学出版社

1998



## 内 容 简 介

本书是近十几年来作者在黄土高原实地考察、野外定位观测、室内外模拟试验研究的基础上对黄土高原基本地貌单元小流域的侵蚀产沙过程与模拟进行全面系统的论述。全书分十四章。主要内容有:降雨特性与降水侵蚀力,土壤侵蚀特性,降雨溅蚀及其影响因素综合分析,表土结皮过程、性质、微形态特征及其对侵蚀产沙过程的影响和 PVA 对改良土壤结构的作用,入渗过程与土壤含水量变化,细沟发生临界、发生发展过程及侵蚀产沙作用,临界坡度、临界坡长及坡面侵蚀产沙过程,植被覆盖及临界意义,小流域侵蚀产沙的垂直分带性规律,重力侵蚀与洞穴侵蚀,小流域泥沙输移比计算与沟道输沙规律分析,小流域侵蚀产沙过程模型,人类活动对小流域侵蚀产沙的影响,以及野外定量试验观测小区、模拟降雨试验方法与技术、全坡面大型模拟降雨装置和测试技术等。

本书可供水土保持、土壤、地理、自然资源、国土整治、农林牧和水利等部门的科技工作者及大专院校有关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟/蔡强国等著.-北京:科学出版社,1997.  
ISBN 7-03-006156-X

I. 黄… II. 蔡… III. 黄土高原-小流域-土壤侵蚀-沙害-研究 IV. S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 14499 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1998 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
1998 年 4 月第一次印刷 印张: 16½ 插页: 1  
印数: 1—850 字数: 373 000

定价: 35.00 元

## 序

自 1992 年联合国环境与发展会议召开以来,可持续发展已成为许多国家公众与政府普遍关切的问题。其中如何保护与合理利用土地资源以适应人类社会对农林牧产品不断增长需要的问题,很早以前就已受到科学界的重视。有关对其的调查研究日益增多,对其前途的预测,在不同时期大体上有持悲观、乐观和谨慎的乐观三种态度,而以最后一种态度与实际历史行程大体相符。其一个明显的原因是,科学技术的发展抵消了许多本来会起消极作用的因素。在本世纪最后两个十年中,有许多科学家展望 21 世纪的来临,殚精竭思,质疑问难,所见各不相同,而皆持之有故,言之成理。关心此问题的读者往往在“山回路转疑无路”之际,忽然“水暗山明又一村”。有时满怀光风霁月,旷朗无前,不旋踵而山雨欲来,狂涛拍岸。此类实例,遽数难终。其中,最足发人深省者莫过于 70 年代上半叶的三项工作:第一项是美国总统科学顾问承总统之命组织专家撰写的“全球 2000 年报告”。此报告于 1980 年出版,发行 100 万册以上,还至少被译为五种文字。脱稿以前,卡特总统已将所得结论提交于意大利召开的国际经济高峰会议讨论,出版以后,白宫更建立工作班子在国内国外组织讨论和宣传,一时声势浩浩,响彻云霄。卡特去任,新当选总统在这一点上仍然萧规曹随,因而其所持的悲观议论 17 条流传甚广。在中国也有人不加思考,轻于听信。报告内有许多言过其实的内容,推论更有失稳健。然中国 1979 年的实际粮食产量,就已超过了它所预期的中国 2000 年的粮食生产,而该报告还尚在印刷中。该书问世以后,曾一时议论纷纷。1984 年由 J. Simon 与 H. Kahn 主编、25 位学者执笔的《富饶的地球》一书出版,对 17 条作了一一驳诘,一扫悲观论调,但又偏向另一极端,仍然有失平允。1985 年,世界资源研究所邀请来自 20 个国家的专家和企业家人 75 人讨论“全球可能性”,18 位科学家又撰写一报告,并以此为书名于同年出版,既承认全球面临的形势严峻,困难重重,但又指出如能迅即朝向正确的方向,就讨论所提出的 13 项议程(包括科学与研究在内)不懈地努力工作,仍有足够的时间使持续发展成为可能。无视困难,或者看不到解决困难的可能性,都必将陷于迟疑坐困的境地。只有正视困难,千方百计地解决困难,才能登于衽席之安。当讨论会涉及农地问题时,指出了一点过去的事实,即农业现代化忽略了气候比较干旱的地域和坡地。在这些地区的科学研究现没有达到能在实践上发挥足够作用的程度。今后需求增多了,这些地区的生产和科学技术都必须有显著的进展。《黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟》一书是有关坡地利用科学研究的著作。由上所述,这在今后,亟应发展和提高?土壤侵蚀与土壤保持的研究都是经验性的研究,发展与提高密切关联;二十年、三十年的测定比二三年的测定可以看到多得多的特点;由更密的测点可以推断出更多自然特点与措施的作用;有了较精确的测定,粗一点的测定仍有参考价值。我以为以后工作重点应放在工作质量适度的提高上。如何界定适度提高?这就是一个有待研究的问题。如何开

始？我认为应从既有工作中的较细方法开始。现在这本书包括了较多的从目前水平来说是比较细的方法以及用这些方法所得的数据。研究应尽可能将土壤侵蚀与土壤保持结合在一起。我很高兴能够看到此书的出版，希望这将有助于土壤保持工作，有助于下一步的土壤侵蚀与土壤保持研究。

黄集德

## 前 言

本书主要以黄秉维院士指导下由蔡强国所完成的博士学位论文为基础,补充了近期的部分研究成果,其主要来自我们在国家自然科学基金项目“黄土高原粗泥沙来源和侵蚀产沙机理”、重大国家自然科学基金项目“黄河流域环境演变与水沙运行规律”等所承担和完成的研究课题和由加拿大国际发展署(CIDA)支持的中加合作研究项目“黄土高原土壤侵蚀管理地理信息系统(SEMGIS)”;对以上成果进行系统的总结和提高,以便使这些研究成果能进一步完善,使其得到更加广泛的推广应用。

在黄土高原丘陵沟壑区,每一个沟道小流域都是一个完整、独立的自然侵蚀-输移-产沙系统,也是侵蚀地貌发育的基本单元。小流域的侵蚀产沙基本包括了黄土丘陵沟壑区的各种侵蚀产沙过程,它们的土地类型和土地利用结构空间分布有较好的规律性和相似性。本书以小流域为基本单元定量研究侵蚀产沙过程,揭示其内在机制与规律,不但在理论上具有普遍意义,而且有较广的实用价值。自80年代以来,在全国范围内推广户包小流域,小流域治理成为水土保持规划与治理的基本单元和重要途径;本书所叙述的一系列研究成果将为制订小流域水土保持规划、治理措施和综合开发提供理论依据。

近十几年来,国际上的同类研究较注重侵蚀过程,揭示其内在规律,对临界值的探讨成为定量研究的重要内容。本书的小流域侵蚀产沙过程与模拟,以定量研究为出发点,强调侵蚀过程、侵蚀机制、侵蚀临界,以及各个影响因素之间的交互作用,尤其注意地貌因素和地貌临界在侵蚀产沙中的作用,小流域内各部分之间的相互作用与演化关系的研究,小流域泥沙输移比计算与沟道输沙规律分析等,这些基本是当前侵蚀产沙研究中的难点,也属于国内外同类研究的前沿研究课题。本书主要在流域侵蚀产沙研究的四个方面作出了贡献,并有所创新:(1)坡面降雨径流与侵蚀产沙过程;(2)沟坡与小流域侵蚀产沙过程研究;(3)在地理信息系统支持下的小流域侵蚀产沙模型;(4)侵蚀产沙试验技术与方法。

本书以黄土高原黄土丘陵沟壑区典型小流域的主要侵蚀特点和侵蚀过程出发,并以土壤侵蚀的产生、泥沙的运移和流域产沙的全过程为主线来构造全书的主要内容和章节;主要以大量的野外观测和室内外模拟试验数据来说明问题,揭示不同地貌部位的侵蚀过程和内在机理。我们在地理信息系统支持下所建立的小流域侵蚀产沙过程模型有其独到之处,它是由三个子模型构成:坡面子模型、沟坡子模型与沟道子模型,这样,不仅能在各个子模型中更好地定量表征内在的侵蚀产沙过程和规律,充分利用地理信息系统的优势,大大提高定量计算的精度,而且能较为真实地反映小流域内不同地貌部位的侵蚀产沙与泥沙输移过程,以及它们之间的相互关系与交互作用。

我们利用近十年来与国外合作的有利条件,以及参加有关国际学术讨论会,查阅了国内外有关文献资料,密切注视有关期刊杂志和最新研究成果,所以对国内外同类的研究动向和最新发展较为了解。故本书对同类研究成果均有综述,这样本书对相应研究内容作出的贡献也比较清楚,并列出了相当数量的我们所引用的有关参考文献目录,有利于读者查

阅。

除署名作者外,本书也反应了这些年来与我们共同合作研究者的成果,他们是:中国科学院地理研究所:吴淑安高级试验师、陈浩副研究员、马绍嘉高级工程师;原在中国科学院地理研究所工作,曾经共同在黄土高原奋斗过的有:朱同新(现在加拿大多伦多大学地理系攻读博士学位),张勋昌博士(在美国获博士学位,现在美国国家泥沙试验室工作),李刚博士(在美国 Buffalo 大学再次获博士学位,现在美国 California 大学任教),陈皓(现在加拿大多伦多市工作),李高社(现在加拿大 Victoria 大学攻读博士学位);山西省水土保持研究所:曾伯庆高级工程师、王福堂所长、贾志军副所长、张治国工程师、卫中平工程师等;武汉华中农业大学土化系:张光远教授、蔡崇法副教授、丁树文老师等,我们在黄土高原曾一起工作,本书也是我们合作研究的成果。本书的出版还得到山西省水利厅刘润堂副厅长、水土保持局李仰斌局长、水土保持规划队李文银队长和水土保持外资项目办公室徐茂杰主任等的大力支持。在此对他们表示深深感谢。

尤其让我们怀念的是加拿大多伦多大学陆兆熊教授。由黄秉维院士邀请,陆兆熊教授1984年来黄土高原考察,我们开始合作研究,先后共同完成了加拿大国际发展研究中心(IDRC)支持的中加合作研究项目“中国南方水土保持研究”(1987—1989年),中加合作研究项目“晋西黄土高原土壤侵蚀规律研究”(1984—1989年),共同参加主持完成了由加拿大国际发展署(CIDA)支持的合作研究项目“黄土高原土壤侵蚀管理地理信息系统(SEMGIS)”(1988—1992年)和由加拿大国际发展研究中心支持的中加合作研究项目“长江流域管理预研究”(1994—1995年),获得了丰硕的研究成果,得到中加双方管理官员和国内外同行的好评。正当我们积极申请新的合作研究项目时,陆兆熊教授由于劳累过度,诱发脑溢血。这本专著原计划是由我们共同来完成的,现在已经成为一个无法弥补的遗憾;但是我们的部分合作研究成果在本专著中也得到了反应,这也是表达对陆兆熊教授的怀念之情。

本书的第一章和第十三章由陈永宗研究员执笔,第二章、第七章和第十二章由蔡强国、王贵平共同完成,其余章节由蔡强国执笔,最后由蔡强国汇总定稿。

# 目 录

## 序

## 前 言

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| <b>第一章 绪 论</b> .....                  | (1)  |
| 第一节 问题的重要性.....                       | (1)  |
| 第二节 小流域研究的意义.....                     | (3)  |
| 第三节 侵蚀产沙的主要特点.....                    | (6)  |
| <b>第二章 小流域地貌演化过程和降雨特性</b> .....       | (9)  |
| 第一节 地貌演化过程.....                       | (9)  |
| 第二节 降雨特性分析 .....                      | (13) |
| 第三节 侵蚀性降雨与侵蚀产沙 .....                  | (16) |
| 第四节 降雨侵蚀力 .....                       | (18) |
| <b>第三章 降雨击溅侵蚀</b> .....               | (21) |
| 第一节 降雨特性对溅蚀的影响 .....                  | (21) |
| 第二节 前期土壤含水量的作用 .....                  | (25) |
| 第三节 溅蚀与坡度的关系 .....                    | (28) |
| 第四节 植被对溅蚀的影响 .....                    | (29) |
| 第五节 多元回归正交试验研究 .....                  | (33) |
| <b>第四章 土壤抗侵蚀特性</b> .....              | (40) |
| 第一节 黄土的抗冲特性 .....                     | (40) |
| 第二节 生物结皮的作用 .....                     | (45) |
| 第三节 小流域土壤抗剪力时空变化规律 .....              | (46) |
| 第四节 犁底层的形成过程及影响 .....                 | (51) |
| <b>第五章 表土结皮形成过程及其对径流侵蚀产沙的影响</b> ..... | (58) |
| 第一节 表土结皮微形态特征和强度研究 .....              | (58) |
| 第二节 表土结皮形成过程及其对溅蚀的影响 .....            | (61) |
| 第三节 黄土发育表土结皮的微结构分析 .....              | (63) |
| 第四节 表土结皮对坡面降雨径流侵蚀产沙的模拟降雨试验 .....      | (67) |
| 第五节 坡耕地表土结皮对降雨径流和侵蚀产沙过程的影响 .....      | (68) |
| 第六节 PVA 对改良黄土表土结皮性的作用 .....           | (73) |
| <b>第六章 降雨入渗规律和土壤含水量变化</b> .....       | (79) |
| 第一节 小流域内的入渗分布规律 .....                 | (79) |
| 第二节 降雨入渗方程 .....                      | (84) |
| 第三节 土壤含水量变化规律 .....                   | (87) |



|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第七章 细沟发生临界及侵蚀产沙作用</b>        | (92)  |
| 第一节 细沟侵蚀研究述评                    | (92)  |
| 第二节 影响细沟侵蚀的因素                   | (94)  |
| 第三节 细沟发生临界                      | (98)  |
| 第四节 细沟的侵蚀产沙作用                   | (103) |
| <b>第八章 地貌、植被覆盖度及其临界</b>         | (107) |
| 第一节 坡度                          | (107) |
| 第二节 临界坡度                        | (111) |
| 第三节 坡长与临界坡长                     | (115) |
| 第四节 坡长在坡面侵蚀过程中的作用               | (119) |
| 第五节 坡向                          | (126) |
| 第六节 植被覆盖度及临界                    | (128) |
| <b>第九章 小流域侵蚀产沙的垂直分带性规律</b>      | (135) |
| 第一节 研究方法                        | (135) |
| 第二节 水沙关系的垂直分带性规律                | (137) |
| 第三节 上部来水来沙的作用                   | (141) |
| 第四节 坡面与沟坡之间的水沙关系                | (144) |
| <b>第十章 重力侵蚀与洞穴侵蚀</b>            | (148) |
| 第一节 重力侵蚀地貌临界和时空分布规律             | (148) |
| 第二节 红土泻溜过程及时空分布                 | (157) |
| 第三节 洞穴水文特性与产沙                   | (164) |
| <b>第十一章 小流域泥沙输移比计算与沟道输沙规律分析</b> | (172) |
| 第一节 概念                          | (172) |
| 第二节 泥沙输移比研究近况                   | (174) |
| 第三节 泥沙输移比随时间变化规律                | (176) |
| 第四节 次降雨泥沙输移比的分布规律               | (178) |
| 第五节 影响泥沙输移比因素分析                 | (180) |
| 第六节 次降雨泥沙输移比计算                  | (183) |
| 第七节 小流域输沙规律分析                   | (185) |
| <b>第十二章 小流域侵蚀产沙过程模型</b>         | (188) |
| 第一节 模型结构                        | (188) |
| 第二节 坡面子模型                       | (190) |
| 第三节 沟坡子模型                       | (196) |
| 第四节 沟道子模型                       | (199) |
| <b>第十三章 人类活动对小流域侵蚀产沙的影响</b>     | (204) |
| 第一节 现代侵蚀的重要动力                   | (204) |
| 第二节 人为破坏植被对侵蚀的影响                | (205) |
| 第三节 土地翻耕的作用                     | (208) |

|             |                                 |       |
|-------------|---------------------------------|-------|
| 第四节         | 小流域人为加速侵蚀量的估算·····              | (209) |
| 第五节         | 水土保持的减沙效果·····                  | (214) |
| <b>第十四章</b> | <b>试验小区、模拟降雨设备与试验测试技术</b> ····· | (218) |
| 第一节         | 试验观测小区·····                     | (218) |
| 第二节         | 模拟降雨试验设备·····                   | (220) |
| 第三节         | 全坡面大型模拟降雨装置·····                | (225) |
| 第四节         | 盐液示踪技术测定坡面表面水流流速·····           | (229) |
| <b>参考文献</b> | ·····                           | (234) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 问题的重要性

水土资源是人类生存和发展的重要物质基础,是进行农业生产的基本条件。农业一直是人类谋求生存和发展的主要手段,是世界上许多国家的经济支柱;即使再过若干时间,是否有高水平农业生产,仍然是衡量一个国家经济水平的重要指标。农以土为本,没有土壤就没有农业,人类不可能指望依靠无土栽培解决粮食问题。土地肥沃是物产丰富的前提,是人民富裕的主要物质条件,所以在人类发展的历史长河中,文明盛衰常常是与支持文明的水土资源条件密切相关(V. Carter et al., 1987)。合理利用土地,则生产发展,人民幸福,国家昌盛;破坏水土资源,也就挖掉了文明发展的基石。中国、埃及、印度和巴比伦(今伊拉克地区)曾被誉为世界历史上的四大文明古国,是人类早期文明的发祥地,其主要原因是黄河流域、尼罗河流域、印度河流域和两河流域(幼发拉底河和底格里斯河流域)的气候适宜,水土资源优裕,为当时最先进的生产方式——灌溉农业提供了实施条件,以后,除了尼罗河流域至今仍是埃及的生命之源外,其它三个地区支持文明的物质条件逐渐被人类自身的愚蠢行为所破坏,今天反而成了当地及毗邻地区人民的忧患。黄河中游黄土高原地区的天然植被遭到人为破坏后,加剧了土壤侵蚀,成为当地人民贫困的重要原因,并促使黄河下游河床严重淤塞,危及两岸人民生命财产安全;温德亚山和喜马拉雅山南坡的森林被砍伐后,土壤侵蚀加剧,洪水泛滥频率增加;印度河的灌溉优势大减,生产力下降,文明程度在世界上的地位下降;亚美尼亚高原的森林和草原被破坏以后,水土流失加剧,影响了下游的灌溉农业,两河流域的兴盛状况受损。在历史近期也不乏由于水土资源被破坏导致经济衰退的例子。所以美国前总统罗斯福曾尖锐地指出,“毁坏自己土壤的国家,最终必将毁掉自己”。

据估计,全世界在整个人类历史时期,由于人类活动使过去肥沃的土地变成贫瘠荒漠劣地的面积有 15—20 亿公顷,现在每年约丧失 700 万公顷土地,这就意味着每年有 2 100—2 500 万人失去了生活基地。土壤侵蚀已成为许多国家的严重灾害。据报道,1776 年美国适宜耕种的表土平均厚度约 23 厘米,由于土壤侵蚀,现在只有 15 厘米。形成 35 毫米厚土壤需要 300—500 年,也就是说美国在 200 年里损失了需要 1 000 年生成的土壤财富,仅此一项每年就损失 40 亿吨土壤和 1 300 亿吨水,损失的营养元素、水和产量加起来的总价值约 270 亿美元<sup>1)</sup>。在宾夕法尼亚州,每年冲掉的土壤厚度平均约 5—10 毫米,也就是说,20—40 年可将该州的土层全部冲光;衣阿华州的土壤流失量高达 50 吨/(公顷·年),按此速度计算,到 2020 年,该州 1980 年的 27.2 万公顷轻度侵蚀土地中将有 7.28 万公顷上升为强度侵蚀,已经达到中度侵蚀的土地中将有 17.96 万公顷上升到强度侵蚀,预

1) 表土流失惊人,威胁人类生存,参考消息,1995 年 3 月,第 4 版。

计到 2000 年由于土壤侵蚀造成的农业损失价值约 430 亿美元,到 2020 年至少达到 810 亿美元。前苏联欧洲部分大约有 5 000 万公顷土地遭到侵蚀,全国农用地若不采取防蚀措施,每年将流失表土 70 亿吨,这还不包括沟蚀的侵蚀量。而沟蚀在前苏联也十分严重,例如库尔斯克州沟壑就破坏了 1.1 万公顷土地;罗斯托夫州,沟网总长达 4 万公里。前苏联全国已有 330 万余条沟,总长度近 100 万公里。土壤侵蚀造成的损失,至少减产和少收获大约 1/3—1/4 各种农作物产品产量。澳大利亚可利用的农牧地中,一半以上遭受侵蚀,仅新南威尔州就有约 7 000 万公顷土地遭受严重侵蚀。印度的土地面积为 3.28 亿公顷,约有 1.75 亿公顷土地遭受侵蚀,全国土壤流失量约 53.34 亿吨,其中 4.8 亿吨淤积在水库中,使水库的蓄水量每年损失 1%—2%,有 15.72 亿吨流入大海(Narayana,1985)。据估计,如果全球的土壤允许流失量按 12 吨/公顷计算,则全球从农地上流失的表土超允许流失量值约 275 亿吨(Brown,1985),还有人估计全球每年流失的表土为 750 亿吨,为此人们每年要多支出 4 000 亿美元。无论这些估计接近实际状况的程度如何,人为土壤加速侵蚀问题已经构成对人类生存和发展的严峻挑战,所以第十二届国际土壤学会发出了“拯救土壤,就是拯救人类”的呼声;1988 年 1 月在曼谷召开的第五届国际水土保持学会上把“为了子孙后代,保护土地资源”作为会标;1992 年联合国在巴西召开的世界环境与发展大会,将它列为大会通过的文件——《21 世纪议程》中的内容之一。

土壤侵蚀对农业生产的直接影响是使土地退化,土地退化也就是土地荒漠化。根据联合国的定义,土地荒漠化是“因各种因素所造成的干旱半干旱和具有干旱的半湿润地区的土地退化,其中包括气候变化和人类活动”。土地荒漠化是当今世界上最严重的环境问题,已被列入《21 世纪议程》中,并于 1994 年 6 月签订了《荒漠化防治国际公约》。目前全世界已退化的土地约 12 亿公顷,相当于中国和印度这两个世界上人口最多国家国土面积之和,并且每年正以 500—700 万公顷速度发展,造成的经济损失约 423 亿美元,对世界约 9 亿人口构成威胁,因此,它是一个严重的全球问题。1984—1991 年全世界增加的 117 万公顷退化土地中,水蚀引起的占 45.1%,风蚀引起的占 41.7%,二者合计占退化土地面积的 86.8%(朱震达等,1994)。可见,土壤侵蚀是造成土地荒漠化的主要方式。我国是世界上土地荒漠化的主要国家之一,仅北方地区的沙质荒漠化面积就有 33.4 万平方公里,南方“石漠化”面积很广,如贵州省占总土地面积 7%,广西壮族自治区占 7.8%(朱震达,1994)。全国土地荒漠化面积正以每年 2 100 平方公里速度扩展。

土壤侵蚀造成土地退化,从而影响粮食产量。粮食问题是当今世界上最紧迫的问题。因为由于全世界人口快速增长,粮食供给不足也十分突出。1830 年左右全世界人口约 10 亿,100 年后(1930 年左右)增加到 20 亿,1960 年增加到 30 亿,1987 年达到 50 亿,1995 年达到 57 亿,现在正在以每年 9 000 万的速度增长,预计到 2000 年将超过 60 亿。这个速度远远超过了粮食增长速度。L. R. 布朗估计,粮食产量在 1950—1984 年期间每年增长将近 3%,1984 年到 1991 年下降为 1%左右,而人口增长的速度却高出它将近 1 倍(陈永宗,1994)。1993 年全世界产粮 18.73 亿吨,比 1992 年减少了 5%。粮食增长缓慢的原因虽然很复杂,但土地退化却是主要原因。

我国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一。全国水力侵蚀面积 179.4 万平方公里,风力侵蚀面积 187.6 万平方公里,二者合计 367 万平方公里,占国土面积 38.2%,其中强度侵蚀以上的面积约占 1/5。根据全国土壤侵蚀强度图统计计算,全国每年土壤流失量约

80—120 亿吨(过去的数字是 50 亿吨,这是偏小了,因为长江和黄河两个流域就有 45 亿吨——长江为 22.4 亿吨,黄河为 22.8 亿吨)。如此严重的侵蚀造成的经济损失有多大,目前还难以计算,但是可以从一些个别例子看出概貌。湖南省每年流失表土 1.5—1.7 亿吨,损失土壤养料 440 万吨;黄河中上游流域 1 000 万立方米以上水库的库容因泥沙淤积已经损失了 31%;洞庭湖水面面积由于淤积和围垦减少了 37%;鄱阳湖减少了 20%;福建、江西的内河航运因河道淤积和水量减少,航运里程缩短了 1/4;山东省全省的土壤流失量约 2.5 亿吨,流失的 N,K,P 相当于 350 万吨标准化肥,每年有 28 万亩土地变成裸岩,不能继续耕种,每年有 6 900 万立方米泥沙淤在水库、塘坝中,至 1989 年全省治理了 17 880 平方公里水土流失面积(我国习惯上把土壤侵蚀和水土流失的含义等同,水土保持与土壤保持意义相同),年净效益 18.87 亿元(按可变价格计算)。贵州省毕节地区,每年水土流失造成的损失 5 亿元。水土流失造成的损失,也可以从水土保持效益中得到反映。至 1992 年,全国已治理水土流失面积 52.7 万平方公里,从而每年增加保水能力约 180 多亿立方米,每年减少土壤侵蚀量 11 亿多吨;40 年来筑坝拦泥 355 亿吨,全国增加产值 630 多亿元。全国已有水平梯田 800 多万公顷,其中黄土高原约 209 万公顷(至 1989 年),如果按黄土高原的梯田比坡地产量每公顷增加 750 公斤计算,仅此一项黄土高原每年可增产粮食 15.7 亿公斤,可以满足 196 万人的口粮(按人均 400 公斤计),基本上可以解决当地人口增长造成的粮食压力。据计算,至 1987 年,黄河流域的水土保持措施,累计蓄水 259.7 亿立方米,保土 70.2 亿吨,累计增产粮食 329.1 亿公斤。

## 第二节 小流域研究的意义

### 一、小流域的含义

小流域是指面积几平方公里至几十平方公里的汇流区域。水利界将这类流域称为支沟或毛沟;水文学中有两种称呼,第一种是直接汇入干流的支流叫一级支流,小流域大多数属于级别最高的支流,譬如三川河是黄河的一级支流,汇入三川河的北川河是黄河的二级支流,王家沟小流域则是黄河的三级支流;另一方案是按照美国学者 R. E. Horton 和 A. N. Strahler 的方法(承继成等,1986),最小的未分枝水道叫一级支流,两条一级支流相汇后的水道叫二级支流,两条二级支流相汇后叫三级支流,余此类推,小流域属于一、二级支流。地貌学中,对于流域面积大小不同的流域有河流、河沟和坳沟(又叫干沟)的名称,小流域相当于河沟或坳沟。50 年代,地貌学家罗来兴、祁延年等将黄土高原千沟万壑流域叫做沟道流域。奥地利将这类流域面积不大(小于 100 平方公里)在长期的地质侵蚀及加速侵蚀(主要是水力侵蚀、重力侵蚀和风化作用)过程中形成的侵蚀地貌单元称为荒溪(王礼先,1984)。由于“荒溪”一词在汉语中的含义容易造成“荒凉”、“荒芜”、“不毛之地”的误会,所以未被我国广泛采用。前苏联的文献中,相当于这种类型的流域叫干沟(Балка)或河沟(Речнаг);美国称为小流域(Watershed)。

流域面积大小只是一个范围概念,必须具备以下两个基本特征的流域才叫小流域:

第一,土壤侵蚀过程自成完整系统,即暴雨径流期,降雨发生雨滴激溅侵蚀,产流以后在分水岭地区形成片流,发生片蚀,分水岭以下坡面片流汇集为散流,进行细沟和浅沟侵



蚀,并开始出现重力侵蚀和潜蚀(或者称为洞穴侵蚀),至谷底散流转变为暴流,发生沟道侵蚀,这是一个完整的水土流失过程,在流域内形成了完整的水土流失体系。这个体系在汇水面积太小的空间,譬如冲沟流域,常常发育不完整;在面积太大的流域,参与了河流过程,侵蚀和堆积交替,使流域的自然过程复杂化。

第二,具备按照生态经济学原理组织农、林、牧生产的有利条件。生态经济学是从生态学和经济学相结合上,以生态学原理为基础,经济学理论为主导,以人类经济活动为中心,围绕着人类经济活动与自然生态之间相互发展关系这个主题,寻求生态系统和经济系统相互适应与协调发展的途径(许涤新,1987),这是当前生态经济学的核心问题。目的是通过建立结构合理、功能高效的生态经济系统,实现生态经济的良性循环,使生态效益和经济效益同步提高,以不断满足人类日益增长的对生存资料、享受资料和发展资料的社会需要,保证人类社会的持续发展。在山区和丘陵地区,生态系统有其脆弱的一面,即易于发生水土流失,因此其经济系统也较脆弱,二者结合构成了水土流失严重山区和丘陵地区生态环境恶化,经济落后的局面。人类要改变这种状况,进行调控,主要是通过实施水土保持措施,其中合理利用土地以安排农、林、牧生产是问题的关键。土地合理利用问题并不是一家一户如何利用土地,而是在一个相当的空间范围内所有土地的合理利用安排。一定空间内土地的合理利用,要能构成一个有机整体,以便发挥土地的整体生态效益和经济效益。这个空间的范围不能太大,太大了不便于农村社会组织形式的管理;也不能太小,太小了显现不出土地利用的整体效益。所谓小流域是指面积不太大(几平方公里到几十平方公里),土壤侵蚀自成系统,生态经济系统便于农村调控的流域。需要指出,所谓土壤侵蚀自成系统,主要是指水力土壤侵蚀而言,风力侵蚀不属于这个范畴,因为风力侵蚀不存在由分水岭至谷地的系统变化。

水土流失区、小流域生态经济调控的主要途径是综合治理。按小流域进行综合治理,这是我国的重要水土保持经验,是经历了几十年治理实践的结晶。小流域综合治理思想,50年代已经形成,1957年农业部、林业部、农垦部、水利部在“关于农、林、牧、水密切配合做好水土保持工作争取1957年大丰收的联合通知”中,明确指出“开展工作时要以集水区为单位,从分水岭到坡脚,从毛沟到干沟,由上而下,由小而大,成沟成坡集中治理,以达到治理一坡,成一坡,治一沟,成一沟”。陇东西峰南小河沟(面积36.2平方公里)、甘肃天水吕二沟(面积12.01平方公里)、陕北绥德韭园沟(面积70.7平方公里)和晋西离石王家沟(面积9.1平方公里)等,都是当时按小流域综合治理的示范典型。但是,在当时对为什么必须按小流域进行综合治理的认识还不深刻,所以虽然科学家们进行的水土保持土地合理利用规划,大多数是以小流域为单元规划,而行政职能部门多按农村社会组织(乡、镇、社)管辖的范围进行规划,目的是便于行政管理。经过多年实践,如果不按流域单元进行综合治理,效果是不佳的。所以1980年4月水利部在山西吉县召开的13省区水土保持小流域治理座谈会上进一步明确了小流域的概念和标准,明确提出了我国水土保持要以小流域为单元进行综合治理,在水利部颁布的“水土保持治理办法”中写进了这一内容,从而在全国蓬蓬勃勃地开展了水土保持小流域综合治理工作。这个变化不仅是水土保持工作方法的改变,而主要是人们对水土流失规律有了深入认识的结果,人们认识到只有顺应水土流失规律,充分利用和应用这个规律,对旧生态经济系统的调控才能获得最佳效果。这是我国人民在处理人地关系上的一次飞跃,是从人是大自然的主人,人主宰自然的错误人地

关系观,进步为人适应自然,人和自然和谐相处的和谐观的飞跃。

## 二、研究意义

研究小流域侵蚀产沙规律,首先是为小流域综合治理提供理论基础,直接为治理实践服务。本书各章的探讨,都体现了这一目的。此外,研究小流域侵蚀产沙过程,对于深入揭露侵蚀机制,认识河流泥沙产生、输移和堆积规律,也具有重要的理论意义。

目前国内外侵蚀产沙和水土保持的研究,大体上可概括为三个方面,即侵蚀产沙机理研究,水土保持技术措施研究和水土保持管理研究。这三个方面研究中,侵蚀产沙机理研究是其它研究的基础,侵蚀机制认识的越深入,防蚀技术的设计和管理方法才会更科学、更有效。美国提倡的免耕法,是对农地上降雨径流侵蚀过程深入研究提出的有效措施。大家很熟悉的通用流失方程(USLE),是进行土地利用管理的有效工具,但它的经验性成分较多,因而80年代中期开始研究新一代模型(WEPP),以替代原有模型。已经基本上完成的WEPP模型,其物理基础较USLE扎实得多。但是WEPP模型中仍有一些土壤侵蚀机制问题还需进一步研究。譬如表土结皮与侵蚀的关系,如果不了解土壤理化性质及其遇水后的变化机理,是无法揭露表土结皮形成、发育和变化原因与过程,及其在降雨侵蚀中的作用,而目前这方面的研究还远未达到成熟程度,因而也提不出有效防治结皮生成的措施。坡地上降雨径流形成的运动机理,目前也还存在许多概念性理解,即使与人们对槽床水流的认识深度相比,还有很大距离。因此,小流域侵蚀产沙机理研究,绝对不是可以忽视不计,而是要加强。没有理论基础的实践是盲目的实践,盲目的实践也可能在某一点上会取得暂时效益,但那是持久的,是很难提高的。

在这里我们还要谈谈“侵蚀产沙”这个术语问题。

严格地讲,侵蚀和产沙是两个不同的概念。前者是指各种外营力(水、风、冰雪、生物等)对地表物质(包括土壤和母质)的破坏,这是从土壤科学提出的定义。从地貌学或地质学定义的侵蚀则要广泛得多,因为土壤科学的侵蚀没有包括河流侵蚀、海岸侵蚀和湖泊侵蚀等,而这些都包括在地质地貌学的侵蚀概念中。产沙是水利学的术语,它是从河流泥沙形成的角度来看待流域泥沙来源。流域侵蚀和流域产沙是紧密联系的,如果没有侵蚀,当然也就不会产沙,但侵蚀产物并不一定会立即成为河流泥沙,这个关系在很多地区(例如平原地区)是很重要的。在黄土高原地区,虽然有的侵蚀方式与产沙关系在时间上有滞后现象(滑塌和崩塌),但一般来说,二者是紧密联系在一起的,侵蚀过程也就是产沙过程;而且,根据目前的研究程度,要用定量资料把重力侵蚀的产沙滞后量分别出来,还不可能。60年代初和80年代初,黄河水利委员会天水水土保持试验站和西北水土保持研究所周佩华等人,试图通过定位观测确定重力侵蚀产沙量,但资料十分有限,不能提供黄土高原重力侵蚀产沙量的全貌。因此,我们在研究小流域水土流失规律时,使用了“侵蚀产沙”这一术语,其含义是指小流域的土壤侵蚀到河流泥沙这一过程。这是一个含混的术语,或者说是具有综合概念的术语。在自然界中,人们至今还有许多问题知之甚少,对这些问题使用综合性术语来描述,可能是一种处理办法。

### 第三节 侵蚀产沙的主要特点

黄土高原是我国土壤侵蚀最强烈的地区。虽然它的风力侵蚀和泥石流作用不如国内有些地区强烈,但水力侵蚀却居全国首位。这是因为黄土区的地面物质组成的抗蚀力极弱,一遇暴雨极易产生高含沙水流,黄土地貌千沟万壑,有利于侵蚀发展。黄土高原的水力侵蚀强度大致以六盘山为界,分为东西两部分,一般是六盘山以东大于山以西,北部大于南部(唐克丽等,1989),小流域侵蚀量的区域变化,也遵从这一规律。六盘山至吕梁山之间的黄土丘陵区,小流域的土壤侵蚀量多在15 000吨/(平方公里·年)以上(表1-1);六盘山以西,因年降雨量较以东减少,暴雨出现几率和暴雨强度也减小,侵蚀量一般在5 000—10 000吨/(平方公里·年)之间。在我国其它地区,侵蚀量达到如此程度的十分少见,而且分布面积如此大的更少。广东省南雄盆地的紫色砂页岩分布区,是我国南方该类岩系分布区侵蚀最强烈的地区之一,有“红色荒漠”之称,其降雨量是黄土高原的2倍以上,而年平均侵蚀量才有15 000吨/(平方公里·年)(唐克丽等,1993);江西兴国县的年侵蚀量约7 000吨/(平方公里·年);广西花岗岩分布区的土壤侵蚀量只有4 095吨/(平方公里·年);四川省遂宁地区的侵蚀量一般都小于8 000吨/(平方公里·年);福建河田长汀花岗岩分布区的侵蚀量为10 000—15 000吨/(平方公里·年),黑龙江省克山县是东北地区土壤侵蚀最强烈的地区,其年侵蚀深度约5—8毫米/年。

表 1-1 黄土高原代表性小流域侵蚀量

| 地点及<br>流域名称         | 晋西离石<br>王家沟 | 陕北绥德<br>韭园沟 | 陕北子洲<br>团山沟 | 陕北子洲<br>岔巴沟 | 陕北安塞<br>纸房沟 | 宁夏西吉<br>黄家二岔 | 甘肃定西<br>安家沟 | 内蒙古准格尔<br>旗五分地沟 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| 流域面积<br>(平方公里)      | 9.1         | 70.1        | 0.18        | 189.0       | 8.2         | 5.7          | 9.3         | 7.7             |
| 侵蚀量<br>[吨/(平方公里·年)] | 15 850.0    | 18 120.0    | 23 948.1    | 21 660.0    | 14 000.0    | 7 375.0      | 5 500.0     | 18 000.0        |

黄土高原的重力侵蚀强度和产沙意义,因侵蚀类型不同而不同。滑坡的侵蚀量最大,但对农业生产的破坏和河流泥沙的影响却较小。1985年8月离石王家沟流域的羊道沟和花曲沟发生滑塌,其体积分别为827立方米和2 450立方米,经过两年(1984—1986年)冲刷,仅有5%和3%成为河流泥沙;崩塌发生的频率较滑塌高,产沙意义也不大。重力侵蚀中只有泻溜侵蚀的产沙意义最大,据小区实测资料推算,王家沟流域的泻溜侵蚀量可达40 000—50 000吨/(平方公里·年),泻溜侵蚀产沙量约占王家沟流域沙量的14%,而泻溜侵蚀的分布面积占全流域总面积的9%(陈永宗等,1988)。

黄土高原土壤侵蚀的其它类型(风力侵蚀、洞穴侵蚀和生物侵蚀等),虽然目前可供使用的定量数据极少,但从定性来讲,也是很强烈的。譬如据山西雁北水土保持研究所观测,晋西北右玉农地的风蚀量达到13 000吨/(平方公里·年);羊道沟上游洞穴侵蚀产沙量占试验研究区(面积0.122平方公里)侵蚀产沙量的23.5%。总的来说,黄土高原的侵蚀强度是很大的,这是该区侵蚀的主要特点。除此以外,还有以下特点。

第一,发生侵蚀的时间集中。水力侵蚀主要发生在6—9月,尤其是7、8月为最,这不

仅是因为年降雨量的 60%—70% 集中在这一时期,而且是因为几乎所有暴雨都发生在这一时期。据天水、西峰、绥德等水土保持科学试验站径流小区观测,6—9 月的侵蚀量要占年总侵蚀量的 90% 以上。每年 6—9 月的降雨径流侵蚀,又集中在几次暴雨期,甚至曾出现一次暴雨侵蚀量占年总侵蚀量 60% 以上的记录。

从每次暴雨径流侵蚀的过程来看,进行强烈侵蚀的时间又很集中,多发生在产流后的 30 分钟以内。在历次暴雨径流侵蚀过程,在农耕地上,由于发生了细沟侵蚀,侵蚀量猛增,大致在产流后 15—20 分钟侵蚀量达到峰值。在相似径流量条件下,产流末期的侵蚀强度远远小于初期(陈永宗等,1988)。

第二,侵蚀类型和强度的空间分布既有区域差异又有垂向变化规律。在小流域内,流域上中下游的侵蚀特点是各不相同的。如果用侵蚀量来反映这种差异,可以用岔巴沟(面积 189 平方公里)的实测资料为代表。岔巴沟是无定河支流大理河的一条支沟,据黄河水利委员会子洲径流站 60 年代测验,其上中下游的侵蚀量(用输沙量代表)如表 1-2 所列,该流域的侵蚀量中游最大,上游次之,下游最小。这是因为该流域在受无定河河床下切影响进行动力平衡调整过程中,目前中游流域正处在最活跃阶段,下游的侵蚀活跃阶段已经过去,上游流域刚刚开始。局部侵蚀基准变化对流域侵蚀的影响,视流域所在区域不同而异,岔巴沟和离石王家沟就不一样。王家沟临近黄河干流,受到黄河干流下切影响较快,目前侵蚀最活跃的部位已经到达上游流域。利用坝地淤积量代表流域侵蚀量,则王家沟上游的支沟花曲沟 1985—1987 年的平均侵蚀量为 15 402 吨/(平方公里·年),同时期中游羊道沟的平均侵蚀量只有 13 486 吨/(平方公里·年)。

表 1-2 大理河支流岔巴沟流域侵蚀产沙量变化

| 河段(站名)    | 流域面积<br>(平方公里) | 多年输沙量<br>(万吨) | 侵蚀产沙量<br>[吨/(平方公里·年)] | 资料来源                                  |
|-----------|----------------|---------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 上游(西庄站)   | 49.0           | 106.33        | 21 700                | 据黄河水利委员会<br>子洲径流站<br>1959—1969<br>年观测 |
| 中游(杜家沟岔站) | 47.1           | 139.486       | 29 600                |                                       |
| 下游(曹坪站)   | 91.0           | 159.44        | 17 500                |                                       |
| 合 计       | 187.1          | 405.256       | 21 660                |                                       |

侵蚀类型和侵蚀强度空间分布的区域差异,实质上是反映了流域所在地区地貌发育过程中侵蚀基面变化的影响,同时又反映各地貌类型不同的作用。后者可以用黄土塬区和黄土丘陵区小流域侵蚀特点来说明。南小河沟是黄土塬区的一条小流域,其上游流域有大面积平坦塬面分布,沟壑密度只有 1.86 公里/平方公里,地面破裂度为 20%,侵蚀较弱;中游流域的塬面面积减少,沟壑密度为 3.9 公里/平方公里,地面破裂度达到 41%,侵蚀十分活跃,下游流域的塬面面积很小,沟间地以梁峁为主,沟壑密度 4.72 公里/平方公里,地面破裂 42%。南小河沟流域除地貌类型外,影响侵蚀的其它因子与离石王家沟没有多大差别,但它的侵蚀量只有 4 350—5 150 吨/(平方公里·年),较王家沟约少 3 倍。

在小流域内,从分水岭至谷底侵蚀类型和强度的分布,呈现出清晰的垂向变化,它构成了小流域侵蚀作用的垂直分带规律(陈永宗,1976)。在黄土丘陵区,垂直分带系统一般是:分水岭及其毗邻地带以水流面状侵蚀为主,兼有风蚀,由此向下,梁峁坡面降雨径流期发生面蚀和浅沟侵蚀,侵蚀强度较面状侵蚀带强,再向下坡至谷缘线附近,出现切沟侵蚀并有洞穴侵蚀,坡面被切沟分割破碎,是沟间地侵蚀最强烈地带,谷缘线以下,谷坡上部陡