

黄土高原坝系流域

侵蚀产沙分布式模型研究

祁伟 关见朝 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

黄土高原坝系流域

侵蚀产沙分布式模型研究

祁伟 关见朝 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以黄土高原小流域（坝系流域）为研究对象，开展了黄土高原坝系流域侵蚀产沙分布式模型研究。内容包括自主研发了流域侵蚀产沙分布式模型，并进一步开发了坝系流域的侵蚀产沙分布式模型，还分析了不同坝系配置条件对流域空间差异性产流产沙的影响以及坝系流域各类型淤地坝的拦泥量变化特点，探讨了分布式模型在流域淤地坝的坝系配置优化中的支撑作用和拓展到不同尺度流域上的技术关键。

本书可作为从事流域侵蚀、水土保持、小流域治理规划的研究和技术人员以及高等院校相关教师和研究生的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

黄土高原坝系流域侵蚀产沙分布式模型研究 / 祁伟，
关见朝著. — 北京：中国水利水电出版社，2017.9
ISBN 978-7-5170-6020-8

I. ①黄… II. ①祁… ②关… III. ①黄土高原—小
流域—侵蚀产沙—模型—研究 IV. ①TV882.84②P512.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第271696号

书 名	黄土高原坝系流域侵蚀产沙分布式模型研究 HUANGTU GAOYUAN BAXI LIUYU QINSHI CHANSHA FENBUSHI MOXING YANJIU
作 者	祁伟 关见朝 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 印 规 格 版 次 印 数 定 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京博图彩色印刷有限公司 170mm×240mm 16开本 7.75印张 143千字 2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷 0001—2000册 68.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

PREFACE

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区，严重的水土流失造成生态环境恶化，威胁着黄河下游防洪安全，制约社会经济的可持续发展。新中国成立以后，对黄土高原进行了大规模的治理，以淤地坝为核心的沟道治理工程是黄土高原水土流失治理的关键措施。本书在黄土高原治理力度不断加强和淤地坝坝系建设蓬勃发展的背景下，瞄准当今陆地侵蚀学科的前沿领域，以黄土高原地区小流域（坝系流域）为研究对象，开展了黄土高原坝系流域侵蚀产沙分布式模型研究，具有一定的理论意义和实用价值。本研究取得的主要成果包括以下 3 部分。

(1) 研发了流域侵蚀产沙分布式模型。自主研发了黄土高原地区基于场次暴雨的小流域降雨径流和侵蚀产沙分布式模型，模型建立在一系列的物理过程基础之上，实现了“沟坡分离”和“产输沙分离”，使模型在物理概念和力学机制的区分上更臻清晰。

选取陕西省黑草河典型小流域进行了分布式模型的率定和验证，并应用所建立的模型，通过设计不同水土保持配置方案，分别计算并对比了不同水土保持措施和不同土地利用方式的减水减沙效益，并对典型小流域水土保持配置方案进行了优化，展现了分布式模型在模拟

空间差异性方面的优势，为配置流域内水土保持措施和优化流域管理提供了技术支撑和科学依据。

(2) 开发了坝系流域侵蚀产沙分布式模型。针对黄土高原坝系流域的特点，进一步研究了不同结构淤地坝的水沙特点及计算模式，首次自主开发了坝系流域侵蚀产沙分布式模型。

模型在应用上选取了黄土高原沟壑区典型坝系流域——马家沟小流域，并基于 GIS 进行了流域地理信息的处理和提取。模型分别计算了未建坝系、现状坝系和规划坝系等不同坝系条件下的流域出口的产流产沙过程并进行了比较，反映了流域内淤地坝及坝系的拦泥蓄水作用和对流域出口水沙过程的调蓄和削峰效应。

(3) 系统给出了坝系配置空间差异性的影响。充分利用分布式模型能反映流域空间差异性影响的特点，进一步分析了不同坝系配置条件对流域空间不同位置（空间差异性）产流产沙的影响以及各淤地坝的拦泥量变化特点。分析结果表明，流域空间不同位置的产流产沙特点有较大差别，所选取的马家沟典型坝系流域的坝系配置、布坝密度和部分淤地坝的库容设计仍有需进一步完善的地方。本书所建立的坝系流域侵蚀产沙分布式模型在流域的坝系配置评价和配置方案优选等方面具有较好的技术支撑作用和应用价值。

本书介绍的分布式模型目前仅在中小尺度的流域上进行了应用，今后如果拓展到大中尺度流域，那么在不同尺度流域上如何界定合适的临界源区面积及其取值标准将可能是本研究的关键所在。从本书的研究成果来看，临界源区面积的取值不同会生成不同的流域沟系，这在一定程度上直接影响着模型计算的流域侵蚀产沙过程。可以确定的是不同尺度流域的临界源区面积的取值应是不同的。由于不同尺度流域的取值标准较为复杂，目前也还没有较成熟的成果，仍有待广大相关研究者下一步深入开展研究。

本书能够顺利出版，首先感谢中国水利水电科学研究院泥沙研究所曹文洪教授级高级工程师、郭庆超教授级高级工程师、刘春晶博士、王玉海博士等人提供的支持和帮助，同时本书的研究成果也得到了“十二五”国家科技支撑计划项目“水沙变异条件下荆江与长江口北支河道治理关键技术（2013BAB12B00）”的资助，在此一并致谢！

由于作者研究水平所限，书中的疏漏和错误不可避免，敬请读者和同行批评指正！

作者

2017年5月于北京

目录

CONTENTS

前言

■ 1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 侵蚀产沙模型发展概况	3
1.3 淤地坝发展概况	9
■ 2 小流域侵蚀产沙分布式模型研究	14
2.1 分布式模型的建立	14
2.2 降雨径流子模型	18
2.3 侵蚀产沙子模型	24
2.4 模型的率定和验证	27
2.5 本章小结	34
■ 3 水土保持措施配置的减水减沙效益研究	35
3.1 水土保持措施及评价方法	35
3.2 水土保持方案设计	36
3.3 水土保持减水减沙效益计算	38
3.4 流域优化配置方案	41
3.5 本章小结	43
■ 4 坝系流域侵蚀产沙分布式模型研究	44
4.1 坝系流域产流产沙计算模式	46
4.2 典型坝系流域的数据准备及处理	53
4.3 模型在典型坝系流域中的应用	62

4.4	本章小结	72
5	坝系配置空间差异性的影响研究	73
5.1	流域不同位置淤地坝的产流产沙过程	73
5.2	流域坝系配置的拦泥量分析	94
5.3	本章小结	105
6	结论与展望	107
6.1	主要研究结论	107
6.2	展望	109
	参考文献	111



1

绪论

1.1 研究背景

流域侵蚀与产沙是当今世界重大的生态环境课题，由它所导致的水土流失问题已经成为困扰农业可持续发展和当地人民脱贫致富的主要障碍。

我国是世界上水土流失最严重的国家之一，水土流失面积占国土总面积的38.2%。在我国水土流失的地区之中，黄土高原地区最为严重。

黄土高原地区东起太行山，西迄日月山—乌鞘岭—贺兰山一线，南达秦岭，北至阴山，面积达64万 km^2 。黄河流经以陇中、宁北、陕北、山西为中心的黄土高原地区核心典型地带。由于该区气候干旱，暴雨集中，植被稀疏，土壤抗蚀性差，加之长期以来乱垦滥伐和污染等人为了的破坏，导致黄土高原成为我国乃至全世界水土流失最严重、面积最大的地区。黄土高原地区的土流失面积达45万 km^2 ，占其总面积的70.9%，每年向黄河下游河道输沙16亿t（近年为12.8亿t），占整个黄河向下游河道输沙量的80%，是造成黄河下游河道成为举世闻名的“地上悬河”的重要原因。

严重的水土流失，造成该区域地表破碎，沟壑丛生，生态恶化；严重的水土流失，造成该区域土地沙化，土壤肥力流失，土地贫瘠，粮食及作物广种薄收，区域经济发展滞后，人民群众生活贫困；严重的水土流失，还对黄河下游河道的防洪和河道稳定构成了极大威胁。

我国黄土高原地区降雨年内分布极其不均（主要集中于5—9月），降雨往往以场次暴雨的形式出现，而且仅由这几个月的场次暴雨所产生的水土流失量就占全年的80%以上。这一特性说明黄土高原地区的水土流失特点是：①水土

流失大多源于场次暴雨事件,侵蚀多发生于场次暴雨历时过程中,因此以月平均或日平均降雨量为尺度来计算该地区对应的水土流失量,其结果多有偏颇;②降雨强度和下垫面条件的时空分布不均匀。

我国目前现有的径流产沙模型多数为集总式模型(Lumped Model)^{[1]-[3]},即把各种不同的影响参数进行均一化处理,并对流域径流泥沙过程的空间特性进行均化模拟,模型结果一般不包含流域径流泥沙过程空间特性的具体信息。这些集总式模型大多采用经验统计方法,具有结构简单、使用方便的特点,但针对黄土高原地区降雨强度和下垫面条件的时空分布不均这一特点,集总式模型存在一些结构性的缺陷。

随着计算机技术的快速发展和地理信息系统(GIS)的引入,为数据的储存、提取、处理和计算提供了快捷、方便的手段,从而让分布式模型(Distributed Model)的发展及应用吸引了越来越多研究者的兴趣^{[4]-[6]},国内很多学者也对此进行了研究。这些研究大多集中于流域产汇流水文模型方面,还较少应用于流域侵蚀产沙模型方面。

分布式模型充分考虑了流域内各个影响因子的空间差异性,它将流域网格化为多个连续的单元,不同单元的流域因子不同,但每个单元的流域因子近似相同。基于这个特点,分布式模型可以反映流域的空间差异性和时空变化过程,也可对流域的任一单元进行模拟和描述,并把各单元的模拟结果扩展为全流域的输出结果;因此它能更恰当地模拟流域的时空过程,模拟结果的可信度也较高,但它所需数据量也较大。

具有物理基础的分布式流域侵蚀与产沙模型正是由于考虑了自然物理过程及下垫面条件等影响因素的空间分布性,能较好地反映不同的下垫面时间空间分布状况和人类活动等对流域侵蚀产沙的影响,是当前流域侵蚀产沙学科的前沿研究领域和未来发展方向。

淤地坝是黄土高原地区防治水土流失十分重要和有效的一种水土保持工程措施。它是由400多年前的“天然聚淤”起源^{[7]-[10]}而逐渐演变形成的,也是广大人民群众在长期的生产实践和同水土流失的斗争中不断探索和创造的智慧结晶,并被当地群众形象地概括为“沟里筑道墙,拦泥又收粮”。实践证明,淤地坝在治理水土流失,改善生态环境,促进农村增产增收和经济可持续发展,以及减少入黄泥沙,实现黄河下游河道稳定等方面发挥着重要的作用。

然而,由许多淤地坝所组成的坝系在减水减沙整体配置上并不协调。以往在黄土高原地区大量修建的基于“水沙不出沟”理念的“闷葫芦”式淤地坝存在很大的水毁风险。原因之一就在于上游淤地坝拦截了几乎所有的水沙,导致下游淤地坝控制的流域来水来沙锐减。一旦上游垮坝,淤地坝多年拦截的水沙

有可能“零存整取”，容易出现下游淤地坝连续发生垮坝的“穿糖葫芦”现象^{[11]-[13]}。

1.2 侵蚀产沙模型发展概况

一直以来，国内外很多学者都十分重视并致力于研究流域侵蚀与产沙这一极其复杂的系统，相应地开发出许多不同类型的流域侵蚀产沙模型。一般来说，目前流域侵蚀与产沙模型分为两大类：经验统计模型和物理过程模型。

(1) 经验统计模型。经验统计模型是在大量实际观测资料的统计分析基础上发展而成的，包括经验模型、单位线法、随机模型、土壤流失—泥沙输移法、灰色系统模型和 BP 神经网络模型等；其特点是应用方便，形式简单，在实际工作中也发挥了较大的作用。但由于经验统计模型不能反映水沙的物理过程，参数无物理意义，无法模拟水流泥沙随时空的变化过程，外延精度差，对人类活动的扰动影响反映较弱，因此它的应用具有很大的局限性。

(2) 物理过程模型。物理过程模型是基于物理成因过程的基础上发展而成的，根据结构的不同又可分为集总式模型 (Lumped Model)^{[14]-[16]}与分布式模型 (Distributed Model)^{[17]-[19]}。其特点是物理基础强，外延精度较高，便于地区移用和向设计条件拓展与延伸，能模拟侵蚀产沙的时空变化，并能通过参数反映人类活动扰动后水沙的变化，是当今流域侵蚀产沙学科的主流研究方向。

相对于集总式模型来说，由于分布式模型考虑了自然物理过程及下垫面条件等影响因素的空间分布性，模型中参数物理意义明确，具有较强的物理基础，是当前流域侵蚀产沙学科的前沿研究领域和未来发展方向。

1.2.1 国外研究现状

国外侵蚀产沙模型的研究以美国为主要代表，同时英国、荷兰、俄罗斯、比利时和澳大利亚等国也开发了各自的侵蚀产沙模型。下面以国外典型模型为例来介绍其研究现状及进展。

1. 经验统计模型

国外经验统计模型以著名的通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 最为成功。

20 世纪 60—70 年代，USDA - ARS (U. S. Department of Agriculture & Agriculture Research Service) 基于 1 万多个小区和近 30 年的实测资料建立了 USLE 模型^{[15][16]}。该方程由于基本包括了坡面土壤流失的主要影响因素，应用的资料范围广，参数物理意义明确，计算简单，从而使 USLE 方程在世界各国

得到广泛应用。

到了 20 世纪 80 年代中期, USDA - ARS 联合推出一项计划, 对 USLE 进行改进, 并于 1985 年 4 月开始实施。改进后的版本——RUSLE 模型^[17] (Revised Universal Soil Loss Equation) 于 1992 年 12 月正式发行。之后, 模型历经数次改进和完善, 其中较为常用的是 SWCS (Soil and Water Conservation Society) 推出的 1.04 版。

2. 物理过程模型

物理过程模型以侵蚀产沙的物理过程为基础, 采用水力学、泥沙运动力学、水土保持学、水文学以及其他相关学科的基本原理, 试图对流域内发生的侵蚀产沙过程进行概化和近似描述。物理过程模型因为能反映土壤的侵蚀机理和水沙的输移过程, 而成为流域土壤侵蚀预报研究的未来主要方向。它作为流域侵蚀和产沙的重要研究手段, 正处于逐渐完善和由传统的集总式模型向分布式模型过渡的发展进程之中。

根据对侵蚀和产沙过程的不同表达与描述, 物理过程模型一般又可分为集总型模型与分布型模型。集总型模型表达流域的总体和平均行为, 并通过计算全流域的有效均值来评价空间参数变化的影响。而分布型模型反映的是土壤侵蚀产沙的时空变化过程; 并把参数变化的流域空间分布数据和算法进行耦合, 来评价它们分布性的影响。

(1) 集总式物理过程模型。

1) CREAMS 模型。1980 年由 USDA 推出了 CREAMS 模型^[18], 主要用于估算农田对地表径流和耕作层以下土壤水的污染。模型由 3 个功能模块组成: 水文模块、侵蚀或泥沙模块以及化学污染物模块。水文模块可以估算日径流量和洪峰流量、渗透、蒸发散和土壤饱和含水量。在进行径流计算时, CREAMS 模型采用两种方法: SCS 曲线法和 Green - Ampt 入渗方程。前者适用于日降雨资料, 后者适用于断点降雨资料。侵蚀模块用修正的 USLE 进行流域坡面侵蚀量的计算, 采用 Foster 等^[19]提出的泥沙连续方程来进行产沙计算。

2) HSPF 模型。HSPF 模型 (Hydrological Simulation Program Fortran) (Johanson et al., 1984) 属于集总式流域侵蚀产沙模型。它主要用于模拟流域的水文、侵蚀泥沙输移以及营养元素的运移等过程, 也可模拟流域或城郊区域流失的无机盐分和溶解氧等。模型中根据土地利用状况及土壤理化指标, 把流域划分为不同的地块, 使每一地块都具有均一的特性; 地表径流、亚表层流和壤中流采用斯坦福流域水文模型 (SWMIV) 计算。模型还考虑了降雪和融雪过程带来的非点源污染问题。模型的具体操作有专门的用户使用手册详细说明。由于模拟结果一般需要有 3~5 年的历史数据进行校验, 而且其复杂度较高, 一般

不易掌握。

(2) 分布式物理过程模型。

1) WEPP 模型。从 1985 年开始, 美国农业部投入大量的人力物力进行 WEPP 水蚀预报模型的研究^{[20][21]}, 到 1989 年基本完成, 后经过多次改进和完善, 于 1995 年正式向外公布。WEPP 模型也是迄今为止最为复杂的与土壤水蚀物理过程相关的一个计算机模型。

在 WEPP 模型中, 入渗过程采用 Green - Ampt 入渗公式计算, 泥沙的运移则采用 Yalin 泥沙输移公式计算, 泥沙沉积的计算方法与 CREAMS 模型中的方法相同。目前有 3 个版本: 坡面版、流域版和网格版。其中, 坡面版和流域版开发较为成功。坡面版主要用于估算均一坡面上的侵蚀量和流失土壤的沉积状况; 流域版用于模拟流域沟道中的产沙、输沙过程以及泥沙的沉积; 网格版适用于与流域边界不相吻合的任意地理区域。这些区域可被划分为若干个单元, 在每个单元内应用坡面版计算侵蚀量。网格版还可用于估算泥沙从一个单元到另一个单元的输移和某个出口断面处泥沙的输出量问题。

在完善开发 WEPP 模型的同时, 美国农业部农业研究和自然资源保护局共同研究开发了浅沟侵蚀预报模型 (Ephemeral Gully Erosion Model, EGEM)^[22], 用于预报单条浅沟年平均土壤侵蚀量。

2) ANSWERS 模型。ANSWERS 模型^[23]最初是由 Beasley 和 Huggins 建立的场次降雨小流域分布式土壤侵蚀模型, 其物理成因很强。该模型将小流域网格化为若干单元, 然后计算每个网格上的径流、泥沙、水流挟沙力和流出此单元网格的径流和泥沙量。该模型能用于评价土地利用和管理措施等的改变对流域径流和侵蚀所造成的影响和它们的空间变化。

随着流域中农田营养元素的流失对水质的不利影响受到不断的重视, 一些研究人员又把流域中 N、P 等营养元素的运移过程也加入到模型中 (Storm et al., 1988; Dillaha et al., 1988), 其中尤以 Bouraoui (1994) 研究的最为深入, 并对模型的源程序做了较大修改。近几年, 美国乔治亚 (Georgia) 大学的 Wes Byne 与弗吉尼亚 (Virginia) 大学的 Dillaha 等人, 又进一步对模型进行了不断改进。

3) EUROSEM 模型。Morgan 等人^[24]根据欧洲的土壤侵蚀研究成果, 开发了适用于预报农田和流域的物理成因很强的土壤侵蚀预报模型 EUROSEM (European Soil Erosion Model)。该模型也是场次降雨的分布式侵蚀模型。模型中侵蚀过程分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀, 并考虑了植物截流对土壤下渗和降雨的影响, 还考虑了地面表层覆盖对土壤下渗和雨滴溅蚀的影响。

4) LISEM 模型。荷兰学者 De Roo^[25]结合本国的实际情况和研究成果, 开

发了 LISEM (Limburg Soil Erosion Model) 土壤侵蚀模型。该模型将土壤侵蚀物理过程与 GIS 相结合。模型的结构以 ANSWERS 模型和 SWAT 模型为基础,源程序由一种 GIS 模型语言写成,其中包含 PC 机上所有的光栅 (raster) 指令,所以可直接与 GIS 结合使用。源程序中的每一个水文或侵蚀产沙过程,都用一到两行 GIS 语句写成。同时,模型与遥感数据兼容,可以直接进行遥感数据分析和处理。模型中渗透与水分运移过程采用了达西定律和连续方程的集成,而其余过程则多用系统模型来描述。模型可以模拟:树木林冠截流、复层土壤中的入渗和土壤水分运动、径流和侵蚀等过程。

1.2.2 国内研究现状

我国流域侵蚀产沙模型的研究已经走过了 50 多年的发展历程,特别是近 20 多年,针对我国陡坡侵蚀严重、沟壑纵横等地貌特征,总结和建立了大量的坡面和流域侵蚀产沙模型,也可划分为经验统计模型和物理过程模型两类。

1. 经验统计模型

中国水土流失严重,影响因素复杂,多年来许多学者对侵蚀产沙的预报做了大量的研究工作,提出了许多适用不同地区的经验公式。

(1) 牟金泽等^[26]根据陕北绥德辛店沟小流域的实测资料,在考虑了土壤前期含水量的作用下建立了一个基于场次降雨的侵蚀产沙坡面预报经验模型。

(2) 马葛乃^[27]针对黄土高原地区的复杂地貌条件,建立了该地区小流域土壤侵蚀模型。模型从遥感影像和地形图中提取参数和数据进行计算,考虑了泥沙的输移作用。

(3) 江忠善等^[28]建立了计算沟间地的场次降雨侵蚀产沙经验模型,将浅沟侵蚀影响以修正系数的方式进行处理,并建立空间信息数据库,实现了 GIS 与侵蚀模型的结合。

(4) 景可等^[29]建立了黄河中游地区侵蚀经验模型。模型主要考虑了沟谷密度、汛期降水量、植被覆盖、切割深度、大于 15°坡耕地占土地面积的比例等因素。

(5) 王秀英等^[30]采用灰色理论与方法建立了流域侵蚀与产沙模型灰色系统软件包,较好地预报了嘉陵江支流小流域的降雨产沙情况。

(6) 张小峰等^[31]以流域降水条件为基本因子,运用 BP 神经网络模型的基本原理,建立了流域产流产沙 BP 网络经验预报模型,用于分析人类活动因素对流域产流产沙的影响。

2. 物理过程模型

我国对于具有物理成因基础的侵蚀产沙模型的研究始于 20 世纪 80 年代后期。由于能够模拟土壤侵蚀过程,并且可调控因子和观测到过程变化,许多学

者致力于侵蚀产沙物理过程模型的研究,取得了可喜的成果。目前国内的侵蚀产沙物理过程模型,大多属于集总式物理过程模型,分布式物理过程模型还处于起步阶段。

(1) 王星宇^[32]通过坡面和沟道土体受力平衡分析,利用悬移质和推移质输沙公式,建立了估计流域产沙量的模型。

(2) 汤立群、陈国祥^{[33]-[36]}根据黄土高原地形地貌以及侵蚀产沙垂直分带性的规律,从流域径流泥沙产输移和沉积过程出发,将流域划分成沟槽、沟谷坡和梁峁坡3个部分,分别进行水沙计算。径流模型中采用 Horton 方程确定入渗量,沟道中采用一维圣维南方程进行径流计算。泥沙模型中通过计算径流挟沙力,比较径流挟沙力与供沙量的关系。

(3) 谢树楠等^[37]从泥沙运动力学的基本理论出发,并根据日本 Komura 的研究成果,通过一系列假定和推导,得出坡面产沙量为坡长、坡度、径流系数、降雨强度和下垫面泥沙中值粒径的函数,同时考虑不同土壤的抗侵蚀能力和植被覆盖对土壤侵蚀的影响,最后得出了流域产沙量的计算公式。

(4) 曹文洪等^[38]采用成因分析的方法,建立了黄土高原地区场次暴雨的小流域产流产沙和输移的公式。模型拓展到大流域时,首先将大流域划分为若干个小流域,由河道将若干小流域相连,其中河道的冲淤计算采用水动力学模型来计算,这样将流域模型与河道模型衔接起来,从而建立了通过降雨来预报整个流域产沙的数学模型。

(5) 祁伟等^{[39][40]}建立了基于场次暴雨的小流域侵蚀产沙分布式数学模型。该模型基于超渗产流模式,能够模拟出流域在不同水土保持措施和不同土地利用类型下的径流和侵蚀产沙的时空过程,可供检测流域管理措施对径流泥沙过程产生的影响,从而能为配置流域内水土保持措施和优化流域管理提供依据。

(6) 蔡强国等^{[41]-[46]}建立了具有物理基础的、基于场次降雨的小流域侵蚀产沙模型;包括坡面子模型、沟坡子模型、沟道子模型3个子模型。模型分别考虑了降雨入渗、径流分散、洞穴侵蚀、重力侵蚀和泥沙输移等物理过程,并从机理上针对影响侵蚀过程的影响因子进行了定量分析。

(7) 陈力、刘青泉^{[47][48]}运用运动波理论结合改进的 Green - Ampt 入渗模型,建立了坡面降雨入渗产流的耦合动力学模型,并运用该模型研究了简单坡面上降雨入渗产流的动力学规律,分析了雨强、土壤初始含水量、渗透系数、坡面阻力,以及坡长、坡度等因素对坡面产流过程的影响规律。刘青泉等^{[49]-[53]}进一步将复杂地表条件对坡面流运动的影响概化为阻力的变化,建立了能够反映地表条件影响的坡面降雨入渗产流模型。

(8) 贾媛媛等^[54]依据黄土高原丘陵沟壑区的小流域地形地貌复杂,同时径

流泥沙具有十分明显的垂直分带性这一特点，建立了由水文模块和侵蚀模块组成的黄土高原地区小流域分布式的水蚀预报模型。其中，水文模块包括了降雨、截留、入渗、地表径流以及沟道流等物理过程，并采用运动波方程进行汇流演算；侵蚀模块中考虑了雨滴溅蚀、坡面薄层水流侵蚀、细沟水流侵蚀、浅沟水流侵蚀、沟道流剥离与沉积等侵蚀物理过程，并运用泥沙物质平衡原理完成了泥沙的输移计算。

(9) 刘卓颖等^{[55]-[57]}建立了黄土高原地区小尺度分布式水文模型，对岔巴沟流域进行了连续 8 年的水沙运动模拟计算；模型中预留了水土保持措施影响下的水沙调蓄计算模块，为以后分析人类活动（尤其是淤地坝建设）对水沙运动规律及特性的影响提供了可能。

1.2.3 研究现状评述

国外特别是欧洲和北美等发达国家在流域侵蚀产沙模型研究方面起步较早，并且借重流域水文模型研究方面的最新成果和研究方法，依托国家大型科研机构（如 USDA - ARS 等机构）的智力储备和研究实力，所以整体研究水平较高，主要表现在：①在模型功能上，国外的流域侵蚀产沙模型不仅具有能模拟流域产汇流和土壤侵蚀产沙的功能，而且一般还同时具有能模拟包括污染物的扩散以及土壤营养元素的输移等方面的功能（如 CREAMS 模型、AGNPS 模型、HSPF 模型、EPIC 模型、ANSWERS 模型等）；②在模型结构上，国外较早开展了分布式流域侵蚀产沙模型的开发与研究（如 1980 年 ANSWERS 模型、1989 年 AGNPS 模型等），到目前为止，分布式模型仍然是当今流域水文和陆地侵蚀学科的前沿领域和研究热点；③在模型的研究手段上，由于地理信息系统技术（GIS）及遥感技术（RS）的迅速发展，国外的研究学者们成功地将其与分布式流域侵蚀产沙模型相结合（如 LISEM 模型），可以方便地获取分布式模型所需要的不同时空条件下的空间数据，为分布式模型的数据输入和分析提供了便利途径。

相对国外的研究而言，我国流域侵蚀产沙模型的研究成果主要集中在经验统计模型方面，物理过程模型的研究起步较晚，且主要是集总式物理过程模型，整体研究水平与国外发达国家相比还有一定的差距，主要表现在：①在模型功能上，国内侵蚀产沙模型主要研究流域的径流和产沙输沙等问题，多用于流域水土流失量的估测和径流平衡等方面的研究，一般不具有模拟污染物的扩散以及土壤营养元素的输移等方面的功能；②在模型的适用性上，国内侵蚀产沙模型大多针对某一特定流域或地区而建立的，尚没有开发出类似于 USLE 模型的中国土壤侵蚀预报模型；③在模型结构上，国内侵蚀产沙模型主要是经验性模型和集总式物理过程模型，还缺少分布式物理过程模型。

集总式模型尽管应用方便，形式简单，在实际工作中也发挥了较大的作用，但由于不能反映水沙的物理过程，参数物理意义不甚明确，无法模拟水流泥沙随时空的变化过程，对人类活动的影响反映较弱，因而其应用性具有很大的局限性。

而与传统集总式侵蚀产沙模型相比，具有物理基础的分布式模型有以下几个显著的优点：①能够描述流域内侵蚀产沙的时空变化过程；②由于建立在DEM基础之上，能够及时地模拟出人类活动或下垫面因素的变化对侵蚀产沙过程的影响；③分布式侵蚀产沙模型的结构较严谨，参数的物理意义明确，可以利用常规理论来描述侵蚀产沙的变化过程。正是由于分布式侵蚀产沙模型物理概念明晰，外延精度高，有利于地区移用和向设计条件延伸等特点，所以它可以模拟侵蚀产沙的时空变化，并可通过参数反映人类活动影响后水沙的变化，是当前流域侵蚀产沙学科的前沿研究领域和未来发展方向。

1.3 淤地坝发展概况

淤地坝是黄土高原地区人民群众借助“天然聚淤”蓄洪排清的理念，在长期同水土流失斗争实践中创造的一种行之有效的既能拦截泥沙、保持水土，又能淤地造田、增产粮食的水土保持工程措施^{[7]-[10]}。已建设的典型淤地坝见图1-1和图1-2。

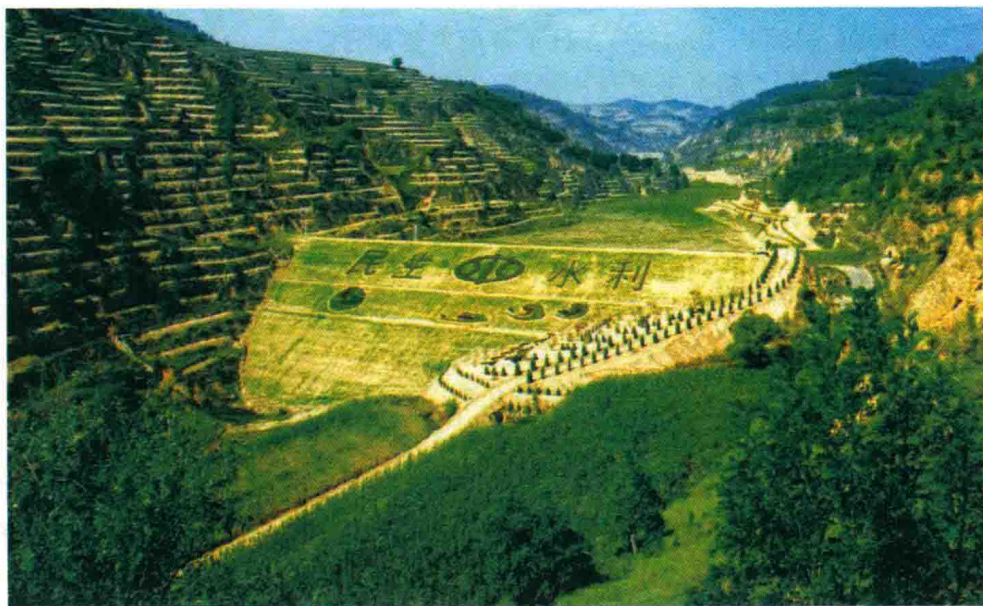


图 1-1 山西省永和县西峪淤地坝