

# 细沟侵蚀物理模型

雷廷武 张晴雯 闫丽娟 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 细沟侵蚀物理模型

雷廷武 张晴雯 闫丽娟 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了作者多年来在土壤侵蚀预报模型参数获取方法和侵蚀模拟方面的最新研究成果。全书共15章。主要内容有土壤侵蚀模型研究的进展、存在的问题和建模难点；细沟侵蚀模型的有限元数值计算方法和有限元的程序设计，不同工况条件下的细沟侵蚀动态过程的模拟；细沟侵蚀传统实验方法及其局限；系统确定土壤侵蚀物理预报模型参数输沙能力、细沟侵蚀剥蚀率、土壤临界剪切力和土壤可蚀性参数的实验方法和数学计算方法；利用多种稀土元素示踪法研究细沟侵蚀产沙过程及细沟剥蚀率的试验方法和计算方法；现有细沟土壤侵蚀物理预报模型基本参数估算方法的缺陷、误差产生的原因和减少误差的方法；对WEPP模型细沟侵蚀产沙方程进行验证；应用有限元方法构建的细沟侵蚀预报模型模拟放水冲刷及降雨条件下的细沟侵蚀产沙过程。

本书可供土壤侵蚀、水土保持、流水地貌、生态、水文、自然地理、国土整治、土壤物理、农林牧和水利等部门的研究人员及高等院校相关专业师生等参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

细沟侵蚀物理模型/雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟著. —北京: 科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-023713-2

I. 细… II. ①雷…②张…③闫… III. 土壤侵蚀—物理模型 (系统工程) IV. S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 198913 号

责任编辑: 彭胜潮 关 焱 王日臣 / 责任校对: 钟 洋  
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年5月第一版 开本: 787×1092 1/16

2009年5月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—1 500

字数: 342 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

# 序

环境和发展问题，是 21 世纪全球面对的核心问题之一。长期土地、植被资源的不合理开发利用，对土地资源的质量造成了很大的负面影响：水土严重流失、生态环境恶化、干旱水灾频繁发生、农业生产力低下并且抵御自然灾害的能力削弱。根据第二次全国土壤侵蚀遥感普查的资料，目前我国土壤侵蚀面积达到 357 万  $\text{km}^2$ ，其中水力侵蚀的面积约占 44%，风力侵蚀的面积约占 54%。水土流失既是造成土地生产力退化的主要原因，又是河流泥沙与水体非点源污染的主要来源，严重的水土流失导致可耕地减少、地力衰减，直至土地生产力的根本性破坏，对农业发展、人们生活和生存构成了严重威胁，是当前影响环境和发展的全球性灾害之一。水土流失直接影响农业生产并将继续影响农业的持续发展，将威胁 21 世纪我国 15 多亿人口的食物安全供给。研究土壤侵蚀过程对于控制水土流失、改善人类的生存环境，特别是对贫困地区的可持续发展具有重要意义。

土壤侵蚀预报模型研究是当今土壤侵蚀科学研究的前沿领域。土壤侵蚀预报研究的重要作用是，估计土壤流失的速度，将预测的土壤侵蚀模数与允许土壤流失量加以比较，从而确定合适的土地利用方式；另外，研究可以用于评价不同水土保持措施的功能与效益。国际、国内研究土壤侵蚀的传统方法多以实地观察、测量、建立侵蚀产沙与若干影响因子之间的经验统计关系（模型）为主。这种研究方法所取得的结果可靠，但将其应用于预报则十分困难。最主要的原因之一是，无法明了土壤侵蚀系统的功能如何随着控制因子变化。由于应用时所遇到的条件与试验时所采用的条件有很大出入，这种情况下往往需通过标定对参数进行调整，而这种调整在一般情况下具有很大的随机性，并且很大程度上受人的主观意志影响。采用这种方式只能进行土壤侵蚀的事后验证，其结果与实测结果相差很大，两者间相差一倍或更大颇为常见。其另一主要不足是这种研究方法预报只能给出极其有限空间、时间点的土壤侵蚀信息，土壤侵蚀发生、发展与演变过程不清楚，即无法回答土壤侵蚀的时间、空间分布规律。这给指导水保实践带来很大困难，因为只有通过对过程的控制才能实现对最终结果——土壤侵蚀的有效控制。目前关于土壤侵蚀预报模型的研究，无论是经验模型还是物理过程模型，都存在模拟土壤侵蚀时空变化规律、模型参数的确定方法、考虑水沙耦合作用等问题，始终是建模技术路线和实证实验的难点。

该书瞄准土壤侵蚀学科前沿，系统阐述作者多年来在土壤侵蚀预报模型参数获取方法和侵蚀模拟方面的最新研究成果。在作用和变量控制下，进行室内细沟侵蚀精细模拟创新实验，对野外因种种原因无法研究的类似变量和作用关系加以分析、控制及精确测量，研究细沟侵蚀过程以及细沟流侵蚀作用过程中系统中物质和能量的分布及转化，细沟水流剪切力作用下土壤颗粒由地表剥离的动力学机制、泥沙的输运力学过

程，与土壤侵蚀预报相关参数的定量测定方法。提出系统确定细沟水蚀预报物理模型中参数体系的实验方法和计算方法。从物理本质的揭示到实证试验与计算方法都提出了独到的见解，分析了土壤侵蚀原方程中求土壤可蚀性参数的缺陷，并提出了改进方法。将建立和改进后的模型参数及计算方法应用于坡面细沟侵蚀数学模型中，利用有限元方法和 C++ 语言对模型进行数值计算并模拟侵蚀产沙过程，通过模拟结果与相应试验结果的对比，验证了数学模型、计算方法及模型参数的正确性。

该书为我国土壤侵蚀的模拟与预报模型发展提供了科学依据，建立的确定基本参数的简捷合理的实验方法体系，为土壤侵蚀模拟与预报模型的建立探索了新的途径，对土壤侵蚀预报模型向完整物理模型发展提供了理论依据和实验方法，从而奠定了具有广泛适用性的坡面水蚀物理过程模型的基础。

该书的出版将为我国土壤侵蚀过程的模拟与预报提供可借鉴的科学信息，促进土壤侵蚀模拟与预报工作深入开展，为自主发展我国的土壤侵蚀模型进行了成功的探索。在此，我愿意向土壤侵蚀、水土保持、自然地理、国土整治、农林牧和水利等有关领域的研究人员及高等院校相关师生推荐这本新著。

中国科学院院士



2008年12月26日

# 前 言

土壤侵蚀既是造成土地生产力退化的主要原因，又是水体非点源污染的重要来源，对农业发展及人们的生活和生存环境构成了严重威胁，是当前全球性灾害之一。土壤侵蚀过程模型对预报土壤侵蚀量、评价土地利用方式、水土保持措施功能效果等具有重要的理论意义和实用价值，是近几十年来国内外有关土壤侵蚀科学研究的前沿领域。目前关于土壤侵蚀预报模型的研究，无论是经验模型还是物理过程模型，在模拟土壤侵蚀时空变化规律的过程中，模型参数的确定、考虑水沙耦合作用机理等始终是建模技术路线和实证实验的难点和热点。细沟侵蚀是坡面水力侵蚀，产沙量大，并且是坡面侵蚀泥沙输送最重要的通道，因此其研究具有重要的理论意义和实用价值。细沟侵蚀规律、演变机理以及相关参数的确定对土壤侵蚀预测预报及相应模型预报极为重要。现有国内同类书籍大都是关于土壤侵蚀经验模型的成果，尚未见系统介绍以物理过程基础的水蚀预报模型及参数研究的专著。

本书针对土壤侵蚀物理模型基本参数的确定缺乏合理的实验和计算方法这一研究热点和难点，结合多年国内外研究工作经验以及我国黄土高原实际情况，以细沟侵蚀过程在实验室模拟再现的方法，提出一套完整的系统确定细沟侵蚀预报模型参数的研究方法。建立系统的细沟侵蚀模型，深入研究细沟侵蚀动态过程、含沙水流的侵蚀产沙规律、细沟侵蚀发展过程中地表地形与土壤侵蚀交互作用、细沟剥离及泥沙输移过程与机理，并用稳定性稀土元素示踪技术对实验结果进行验证。利用有限元方法和 C++ 语言对模型进行数值计算，并模拟细沟侵蚀产沙过程。通过模拟结果与相应试验结果的对比，验证了数学模型、计算方法及模拟程序和模型参数体系的正确性，系统解决细沟侵蚀模型预报所需的所有物理参数的确定方法。

本书瞄准土壤侵蚀学科前沿，系统阐述了模型参数求解方法和侵蚀模拟的最新研究成果，将为今后进一步深入研究提供基础、经验、借鉴，为土壤侵蚀过程的模拟与预报研究提供系统的科学信息，将促进土壤侵蚀模拟预报工作的深入开展。全书包括 15 章。第 1 章讨论土壤侵蚀模型研究目前的进展、存在的问题和难点；第 2 章至第 5 章建立细沟侵蚀动态过程预报的物理模型体系，给出细沟侵蚀模型的有限元计算方法和有限元的程序设计，模拟了不同工况条件下的细沟侵蚀动态过程；第 6 章介绍细沟侵蚀传统实验方法及其局限；第 7 章至第 10 章系统叙述确定细沟侵蚀物理预报模型参数输沙能力、细沟侵蚀剥蚀率、土壤临界剪切力和土壤可蚀性参数的实验方法和数学计算方法；第 11 章阐述利用多种稀土元素示踪法研究细沟侵蚀产沙过程及细沟剥蚀率的试验方法和计算方法；第 12 章从理论上分析现有细沟侵蚀物理预报模型基本参数估算方法的缺陷，分析误差产生的原因并提出减少误差的方法；第 13 章应用提出的参数

计算方法验证 WEPP(water erosion prediction project)模型细沟侵蚀产沙方程的合理性;第14章和第15章应用有限元方法和C++语言建立细沟侵蚀预报模型,模拟放水冲刷及降雨条件下的细沟侵蚀产沙过程。研究结果为进一步研究流域水文模型和土壤侵蚀模型提供基础。

本书是作者们十余年共同研究的成果,研究工作得到了中国科学院“百人计划”和“引进国外杰出人才”项目“水蚀参数量化研究”(982602)、教育部重大项目“细沟土壤侵蚀动力过程模型模拟及其基本参数的系统研究”(重大01-10)、国家自然科学基金重点项目“黄土高原多尺度小流域土壤水蚀动态过程模拟研究(40635027)”的资助,并得到科学出版社的大力支持,在此表示诚挚的谢意。本书成果和书稿在完成过程中得到美国USDA-ARS国家土壤侵蚀研究实验室M. A. Nearing教授、中国科学院水土保持研究所所长邵明安研究员、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室唐克丽研究员、西北农林科技大学刘秉正教授等的亲切指导和大力支持,中国科学院水土保持研究所赵军高级工程师、巨风生厂长、王长斌老师、黄少华老师和张梅英老师在项目完成过程中给予了大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

为了提高可读性和实用性,本书在编著过程中模型所用的公式推导尽可能做到详尽并在书中给出了算例,书后附录给出了部分程序源代码,以供读者参考应用。本书可供土壤侵蚀、水土保持、流水地貌、生态、水文、自然地理、国土整治、土壤物理、农林牧和水利等部门的研究人员及高等院校相关专业师生参考。

限于著者水平,加之室内模拟过程中对问题的概化,不可避免地给细沟侵蚀产沙模型及参数确定带来了一定的误差。如参数构建时没有考虑雨滴溅蚀、入渗的影响,模型模拟假设细沟的形态不随时间、空间变化,这虽然为模型构建和参数确定提供了方便,但所得结论可能不尽完善。有关细沟侵蚀物理模型的研究和应用正处于不断完善之中,书中必然存在许多缺点乃至错误,恳请读者批评指正,也敬请各位专家、学者多提宝贵意见,以丰富及完善土壤侵蚀预报模型研究的理论方法。

# 目 录

序

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 土壤侵蚀与细沟侵蚀研究的重要性 .....	1
1.2 土壤侵蚀预报模型研究进展 .....	3
1.3 坡面流研究进展 .....	9
1.3.1 坡面流数学模型 .....	9
1.3.2 降雨对坡面流的影响 .....	12
1.3.3 坡面细沟流输沙能力公式 .....	14
1.4 细沟侵蚀预报模型研究的意义 .....	15
1.5 模型参数的物理意义及求解方法 .....	17
1.5.1 细沟侵蚀剥蚀率 .....	17
1.5.2 细沟侵蚀输沙能力 .....	18
1.5.3 细沟可蚀性参数及土壤临界抗剪切力 .....	19
第 2 章 细沟侵蚀动态过程与物理模型 .....	24
2.1 细沟侵蚀动态过程描述 .....	24
2.2 一维水流连续性方程 .....	25
2.3 水流动量守恒方程 .....	27
2.4 泥沙质量守恒方程 .....	29
第 3 章 细沟侵蚀模型有限元计算方法 .....	31
3.1 有限元方法的概念及在细沟侵蚀领域中的应用 .....	31
3.2 偏微分方程的近似积分法 .....	32
3.2.1 理论基础 .....	32
3.2.2 线性插值函数 .....	33
3.2.3 一维有限元计算公式——Galerkin 方法 .....	35
3.3 一维细沟侵蚀模型的有限元方法 .....	36
3.3.1 单元有限元方程的推导 .....	36
3.3.2 时间微分处理——有限差分法 .....	43
3.3.3 有限元法的总体合成 .....	45
3.3.4 边界条件处理 .....	48
3.3.5 有限元总体方程的解法 .....	49



<b>第4章 有限元的程序设计</b>	52
4.1 单元矩阵及其计算方法	52
4.2 输入初始数据	53
4.3 一般矩阵的合成与求解	54
4.3.1 总体(全局)刚度矩阵的合成(装配)	54
4.3.2 矩阵的向量化存储	55
4.3.3 矩阵相乘	57
4.3.4 线性方程组的无回代求解	59
4.4 带状矩阵的合成与求解	61
4.4.1 存储带状矩阵	61
4.4.2 合成单元矩阵到带状向量空间	61
4.4.3 引入边界条件	63
4.4.4 向量存储带状方程组的求解	63
<b>第5章 细沟侵蚀过程的模拟与检验</b>	69
5.1 非限定性细沟侵蚀试验及泥沙连续方程参数设定	69
5.1.1 模型的描述	70
5.1.2 有限元计算方法与计算公式	74
5.2 非限定性细沟侵蚀过程的实验模拟与验证	76
5.2.1 方法	77
5.2.2 物性参数	77
5.3 细沟沟床的瞬态演变模拟结果与检验	80
5.3.1 细沟宽度和沟床坡度不随时间、空间变化	80
5.3.2 细沟宽度不随时间变化、空间均匀,坡度随时间变化、空间非均匀	81
5.3.3 时间不变但空间非均匀宽度及时变与空间非均匀坡度	82
5.3.4 时变及空间非均匀变化的沟宽和沟床坡度	85
5.3.5 细沟沟床的瞬态演变模拟结果检验	86
<b>第6章 细沟侵蚀传统实验方法及其局限</b>	89
6.1 试验方法	89
6.2 试验结果	90
6.2.1 泥沙含量与坡度及入流量的关系	90
6.2.2 输沙能力与采样长度的关系	90
6.3 细沟沟宽与泥沙的波动	91
6.3.1 沟宽与坡度及入流量的关系	91
6.3.2 细沟的周期性形态	92
6.3.3 流速与坡度及流量的关系	93
6.4 传统试验方法的局限性	94
<b>第7章 细沟侵蚀过程的系统实验方法</b>	95
7.1 细沟侵蚀动态过程的概念	95

7.2	试验材料和方法	97
7.2.1	试验水槽设计及土壤处理	98
7.2.2	供水及流量控制和试验量测	100
7.3	试验数据及其表达	100
<b>第8章</b>	<b>细沟土壤剥蚀过程</b>	<b>102</b>
8.1	细沟侵蚀剥蚀率及其计算方法	102
8.2	水流含沙量对细沟剥蚀率的影响	103
8.3	细沟剥蚀率与细沟沟长的关系	105
8.4	细沟剥蚀率的解析方法	107
8.5	细沟剥蚀率解析结果的检验	108
8.6	陡坡细沟侵蚀含沙量的解析方法	112
<b>第9章</b>	<b>细沟侵蚀产沙输沙过程与输沙能力</b>	<b>117</b>
9.1	输沙能力及其试验确定方法	117
9.2	细沟输沙能力的解析方法	121
9.3	输沙能力与坡度和流量的关系	125
9.4	输沙能力与水流功率的关系	126
<b>第10章</b>	<b>土壤可蚀性参数和临界抗剪切应力</b>	<b>129</b>
10.1	WEPP模型细沟可蚀性参数估计	129
10.2	(有理)实验法确定细沟可蚀性参数与临界抗剪切应力	131
10.2.1	理论分析及数学推导	131
10.2.2	参数计算及分析	134
10.3	疏松土壤材料中细沟的再生及其临界剪应力的实验研究	138
10.3.1	材料与方法	138
10.3.2	坡度与单宽流量的关系	140
10.3.3	临界剪切应力与坡度的关系	142
<b>第11章</b>	<b>细沟侵蚀动态过程的稀土元素示踪法</b>	<b>144</b>
11.1	REE示踪元素的用法与用量的计算	145
11.1.1	REE示踪元素的选取及坡面布置	145
11.1.2	施放深度及浓度	146
11.1.3	示踪土样的配制	148
11.1.4	冲刷试验设计	148
11.2	计算方法	148
11.2.1	样品采集和土壤侵蚀量的计算	148
11.2.2	含沙量的计算	149
11.3	REE示踪法估算细沟侵蚀产沙分布	149
11.3.1	不同水动力条件下细沟侵蚀产沙分布	149
11.3.2	测定精度	152
11.4	细沟流剥蚀率的REE示踪法研究	154

<b>第 12 章 WEPP 模型细沟侵蚀产沙方程理论分析与实验验证</b> .....	159
12.1 试验结果及解析验证 .....	159
12.2 理论分析及试验验证 .....	161
<b>第 13 章 WEPP 模型中细沟可蚀性参数估计方法误差的理论分析</b> .....	166
13.1 WEPP 模型确定可蚀性参数的实验与计算方法 .....	166
13.2 WEPP 模型细沟土壤可蚀性参数估计误差来源 .....	167
13.3 WEPP 模型细沟可蚀性参数误差的估算 .....	168
<b>第 14 章 模型参数及有限元模拟算法的检验</b> .....	171
14.1 初始及边界条件 .....	171
14.2 集中水流条件下细沟侵蚀随坡长变化过程的模拟 .....	172
14.2.1 模拟程序流程图 .....	173
14.2.2 模拟工况 .....	173
14.2.3 模型输入参数 .....	174
14.2.4 模拟结果 .....	174
14.3 传统输沙能力公式对细沟侵蚀产沙过程的影响 .....	177
14.4 传统土壤可蚀性参数对细沟侵蚀产沙过程的影响 .....	180
14.5 输沙能力与土壤可蚀性参数的共同影响 .....	184
14.6 细沟剥蚀过程 .....	187
<b>第 15 章 降雨条件下细沟侵蚀的有限元模拟</b> .....	190
15.1 有降雨条件下的细沟侵蚀实验 .....	190
15.1.1 实验设计及数据表达 .....	190
15.1.2 初始及边界条件 .....	192
15.2 模型模拟结果与分析 .....	193
15.2.1 模拟流程图 .....	193
15.2.2 模拟结果 .....	194
15.2.3 结果分析 .....	198
15.3 细沟侵蚀过程有限元模拟的可视化 .....	202
15.3.1 系统组成简介 .....	203
15.3.2 系统主要优点 .....	204
<b>参考文献</b> .....	205
<b>附录 模型参数计算程序</b> .....	219

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 土壤侵蚀与细沟侵蚀研究的重要性

水是生命之源,土是生存之本,水土资源是人类赖以生存和发展的基本条件。土壤原本是一种可再生的资源,但在人类活动影响下,水土流失的速度已大大超过了土壤自然形成的过程,使土壤这种可再生资源变成了实际上的不可再生。土壤侵蚀既是造成土地生产力退化的主要原因,又是水体非点源污染的重要来源,对农业发展及人们的生活和生存构成了严重威胁,是当前全球性灾害之一。自 20 世纪 40 年代以来,全球人口急剧增长,工业化进程的加剧以及随之而来对水土等资源的“掠夺式”开发利用,使大面积的水土资源流失。据联合国有关机构的统计,全世界水土流失面积达 2500 万  $\text{km}^2$ , 占全球陆地面积的 10.8%, 每年流失的土壤高达 257 亿 t(伊武军, 2001)。

土地资源的损失已成为全球性的资源环境问题,而发展中国家所面临的状况尤为严重。土壤侵蚀导致可耕地减少、地力衰减,其直接后果就是农业生产条件遭到破坏,吃饭成了问题。被冲走的土,都是表土,对于耕地来说,就是生长农作物的熟土。冲走了熟土,耕地生产能力就会受到根本性破坏。《科学》(*Science*)杂志发表了一篇文章,认为同希腊文明一样古老的玛雅文明,其突然崩溃的原因就是水土流失(Huang et al., 2003)。从公元前 8 世纪开始,玛雅人口剧增,只维持了 1700 年的繁荣。当时危地马拉低地的人口高达 500 万。到 10 世纪时突然崩溃,仅仅数十年间,人口下降到不足原来的 1/10。据研究,直接的原因就是表土被冲走,庄稼种不成,没饭吃,人饿死、饿跑了,文明也随之垮了。

玛雅文明的悲剧绝非孤例。曾养育了辉煌中国文明的黄河流域,同样在遭受严重的水土流失的威胁。我国是一个人多地少,山地多、平地少,高山、高原、荒漠土地多,宜耕地少,土壤侵蚀十分严重的国家。根据第二次全国土壤侵蚀遥感调查,我国现有水土流失面积 356 万  $\text{km}^2$ , 占国土面积的 37.1%, 其中水蚀面积 165 万  $\text{km}^2$ 、风蚀面积 191 万  $\text{km}^2$ (中华人民共和国水利部, 2002)。国家环境保护总局原局长曲格平于 1996 年 6 月在纪念水土保持法颁布实施 5 周年座谈会上发表讲话时提出:“水土流失是我国头号环境问题”,这一观点已在社会上逐步形成了共识(焦居仁, 2002)。

严重的水土流失,给中国社会、经济发展和人民群众的生产、生活以及国家的生态安全带来多方面的危害。一是耕地减少,土地退化严重。据 20 世纪 80 年代统计(卜兆宏等, 1990),我国每年新增水土流失面积达 150 万  $\text{hm}^2$ , 年均丧失耕地 6.67 万  $\text{km}^2$ 。这使我国业已短缺的水土资源(人均水土资源占有量为世界的 1/4)变得更加紧张。另外,土壤侵蚀的发生带走了生物生长所需要的营养物质,从而使土壤肥力和土地生产力迅速降

低。每年有 100 多亿吨沃土付诸东流,相当于流失 1000 万亩<sup>1)</sup>耕地的 30cm 厚耕作层,其流失的氮、磷、钾等养分远大于全国化肥的年产量,而有机质的损失则永难弥补。有学者对黄土高原水土流失区耕层土样进行分析,测定强度侵蚀土壤的有效养分含量多已下降了 50% 左右,大多数接近黄土母质层(彭琳等, 1996;杨文治和余存祖, 1992)。二是泥沙淤积,加剧洪涝灾害。据统计,全国各类水利工程累计淤积泥沙已达 200 多亿吨,淤积的江河湖库,降低了水利设施调蓄功能和河道行洪能力。长江流域的 5 万余座大、中、小型水库(总库容 1200 亿  $m^3$ ),因泥沙淤积已损失库容达 12 亿  $m^3$ (唐克丽, 2004)。黄河在下游形成 800km 的地上悬河,悬河河床高度,相对于两岸河堤之外的平原,现已高出 3 ~ 5m,有的河段达 10m。究其原因,乃是黄河挟沙量大,每年约 16 亿 t 泥沙的 1/4 堆积在这一段坡降不大、水流平缓的河床之中,河底逐年淤垫(李鄂荣, 1999)。三是生态环境恶化,贫困加剧。土壤侵蚀对地表的剥蚀结果导致土地的荒漠化或石漠化,从而改变了土地原有的地貌形态,形成了广阔的沙地或沙丘。同时,土地的荒漠化或石漠化加剧了气候环境的进一步恶化,破坏了人类的生存空间。据统计,我国特大沙尘暴天气发生次数从 20 世纪 50 年代的 5 次,发展到 70 年代的 13 次,90 年代增加到 23 次(唐克丽, 2004)。四是水土流失严重地区,“人地”矛盾突出,形成“越穷贫越垦,越垦越穷”的恶性循环。目前,全国有 592 个国家级贫困县,5800 万贫困人口,其中 80% 以上的贫困人口生活在生态环境比较恶劣的水土流失地区(中国水土保持情况介绍, 2002;朱登铨, 1996;姜春云, 1997)。

研究土壤侵蚀过程、控制水土流失对于改善人类的生存环境,特别是对我国贫困地区的可持续发展具有重要意义。在对土壤侵蚀的研究中,坡面被认为是土壤流失的产生和汇集地,其作为流域的基本组成单元,往往是土壤侵蚀过程研究的开始(白清俊, 1999;刘青泉等, 2004)。据统计:黄河入海的细颗粒泥沙,相当部分来自坡耕地表土。有研究表明:某些流域的坡耕地土壤流失量占全流域总流失量的一半以上(唐克丽等, 1983)。细沟侵蚀是坡面薄层水流汇集成线性小股水流时对地面冲刷而形成的细小沟状侵蚀(唐克丽, 2004),它是黄土高原坡耕地土壤侵蚀的主要方式之一。作为面蚀向沟蚀转化的特殊阶段,细沟侵蚀是坡面侵蚀机理及预报研究中的重要组成部分。唐克丽(2004)通过对杏子沟流域侵蚀产沙研究得出:坡耕地侵蚀产沙以细沟侵蚀、浅沟侵蚀为主,其侵蚀产沙量占总输沙量的 25% ~ 30%,坡耕地的细沟产沙量可占总输沙量的 50%。郑粉莉(1988)基于对陕北黄土丘陵沟壑区的定位观测、野外调查和室内人工降雨资料发现:在细沟侵蚀区,细沟侵蚀量可占总侵蚀量的 74%,在细沟浅沟侵蚀区,细沟侵蚀量一般占浅沟侵蚀量的 12% ~ 30%,最大可达 40% 以上。

细沟侵蚀降低了土地肥力和可耕性,坡面水蚀动力学特性决定了侵蚀径流优先输送较细土粒,侵蚀是土壤养分流失的动力和条件。土壤的有机质和全氮(主要为有机氮)与侵蚀物质中的细颗粒结合,带走了生物所需要的营养物质(张兴昌等, 2000)。细沟侵蚀也是沟道、库渠、河流泥沙的重要来源,被冲走的细沙最终将进入沟道、河流和水库等水系,导致沟塘库渠淤积,农业排灌能力下降(唐克丽, 1984b;刘秉正和吴发启, 1996)。黄

1) 1 亩 $\approx$ 666.7 $m^2$ 。

河平均每年输入下游的 16 亿 t 泥沙中约有 40% ~ 60% 来自黄土高原的坡耕地。据唐克丽(1984a)推算,在黄河多年平均 16 亿 t 的输沙量中,约有 4.8 亿 ~ 8 亿 t 来自坡耕地较肥沃的表土,如按耕层 20cm 计,每年损失有效耕地面积 22 万 ~ 36.7 万  $\text{hm}^2$ 。因此,无论对提高黄土高原人民的生活水平,还是根治黄河水患,研究并预报黄土高原的土壤侵蚀都是当务之需。细沟侵蚀是面蚀向沟蚀转化的特殊阶段,是黄土高原坡面土壤侵蚀的主要方式之一,其研究在坡面侵蚀机理研究及预报中有着重要的意义。同时,由于细沟侵蚀与浅沟侵蚀的相似性,对细沟侵蚀机理的认识将有助于对其他沟蚀的理解与研究。

## 1.2 土壤侵蚀预报模型研究进展

土壤侵蚀学属应用基础学科,它源于生产又服务于生产,是伴随着生产实践和社会的发展而诞生和发展起来的(刘秉正和吴发启,1996)。土壤侵蚀是指土壤在内、外力(如水力、风力、重力、人为活动等)作用下被剥蚀、输送和沉积的过程。水土流失则是指由水作用为应力造成水土资源和土地生产力的破坏和损失,它直接反映了土壤侵蚀的危害程度。与土壤侵蚀相比较,在应用“水土流失”概念时,水不仅是作为引起土壤侵蚀的应力,同时也是农业生产的资源要素。从农业生产角度而言,土壤侵蚀不仅会造成土壤及其养分的流失,也将造成土壤水分和水资源的流失。

土壤侵蚀预报研究的主要目的在于预测、预报土壤侵蚀流失量,并进一步预测泥沙输移对入河泥沙的影响(唐克丽,2004)。已开发的侵蚀产沙模型,可以归纳为经验性模型和物理概念性模型两大类。过去对坡面侵蚀过程的研究总是从大量的观测和定性描述着手,以达到经验概括、形成理论和建立模型(刘秉正和吴发启,1996;戚隆溪和王柏懿,1995)的目的。由于各国所处的自然环境及社会经济状况不同,土壤侵蚀发生和发展的动力及表现形式也各具特点,加上科技文化发展的不均衡以及水土流失危害程度的差异,形成了土壤侵蚀研究的不同特点。我国对于土壤侵蚀的研究可以追溯到公元前 10 世纪的西周时代,《诗经》中就有朴素的土壤侵蚀原理及合理土地利用重要性的记述。到 20 世纪 20 年代末,受西方科技发展的影响,我国开始了土壤侵蚀科学研究,先后在不同地方建立了水土流失试验区,积累了一些研究资料和经验。

我国的土壤侵蚀产沙模型研究是从 20 世纪 50 年代开始的。早期建立的土壤侵蚀和产沙模型大都是经验性的,其中 50 ~ 60 年代初建立的经验模型仅限于进行坡耕地侵蚀量计算。从 20 世纪 70 年代美国通用流失方程引进我国以后,一些研究者陆续以土壤流失方程为原型,根据各自不同研究地区的实际情况进行相应的修正,建立了若干个地区性降雨土壤流失预报方程。在流域模型研究方面,先后提出了一些各具特色的流域侵蚀产沙经验模型。例如:70 年代末,江忠善和宋文经(1980)根据陕北、晋西、陇东南黄土丘陵沟道小流域的水文泥沙观测资料,建立了包括洪水径流量、地形坡度、土质和植被等影响因素的未治理小流域一次降雨产沙量的预报模型。牟金泽和熊贵枢(1980)根据陕北子洲岔巴沟流域的观测资料,建立了小流域一次洪水和全年的产沙量预报模型。刘宝元于 2001 年(刘宝元等,2001;蔡强国和刘纪根,2003)建立了中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE),可以用于计算坡面上多年平均土壤流失量,此模型确立了中

土壤侵蚀预报模型的基本形式,形式简单、内容实用,易于在不同地区推广应用,其基本形式为: $A = RKLSBET$ ,其中  $A$  是坡面上多年平均年土壤流失量 [ $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $R$  是降雨侵蚀力 [ $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ];  $K$  是土壤可蚀性 [ $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ];  $L$  是地形的坡长因子(无量纲单位);  $S$  是地形的坡度因子(无量纲单位);  $B$  是水土保持的生物措施因子(无量纲单位);  $E$  是水土保持的工程措施因子(无量纲单位);  $T$  是水土保持的耕作措施因子(无量纲单位)。全国性 CSLE 模型建立和应用的关键在于以下四个方面:①资料标准的统一、修正;②不同区域各因子的修正体系的确立;③模型在不同区域流域内的验证;④新技术 RS、GIS 在实际预测中的应用等。所有这些经验土壤侵蚀模型,都是借鉴美国的通用土壤流失方程,再结合中国的实际状况,对其中的一些因子进行重新量化和统计分析后建立的。这些经验模型只预测侵蚀结果,不涉及侵蚀过程,不能对侵蚀作出理论性解释。同时,由于一些因子的标准在不同地区的差异,模型的推广也受到一定的限制。这些土壤侵蚀模型在一定意义上对我国的土壤侵蚀模型研究起到了很好的推动作用,但对于土壤侵蚀的精确预报而言,还需要进一步的探索和研究。

20 世纪 80 年代以后,对侵蚀过程的研究取得了长足进展。80 年代以来,我国开展了侵蚀与产沙物理过程模型的研究。王礼先和吴长文(1994)从侵蚀的水动力学原理出发,利用一维水流模型,把导出的坡面流近似模型与侵蚀基本方程耦合求解,得出了坡地侵蚀的数学模型。该模型既适合缓坡,亦适合陡坡;既可用于坡度变化的裸坡,又可用于有植被的林地、农地,但由于它是一种数学解析模型,因而限制条件也较多。它不适合坡度变化的复合坡面;对不同耕作措施的情况亦未做深入研究;模型参数的选取还需做大量的工作(汤立群和陈国祥,1994)。汤立群(1996)分析了物理成因产沙模型研究中亟待解决的几个问题,从流域水沙产生、运动和沉积的过程及机理出发,尝试建立了流域产沙随时间、空间分布的确定性模型。包为民(1995)提出了概念性坡面产沙、沟蚀产沙、坡面汇沙和沟道汇沙模型,并结合水文学中的概念性汇流计算方法,构成了一个有一定物理意义的流域水流、泥沙耦合模型。蔡强国等(1996)利用 GIS 的空间分析功能对侵蚀产沙的过程进行量化研究的尝试,建立了一个有一定物理基础的能表示侵蚀—输移—产沙过程的次降雨侵蚀产沙模型,它由三个子模型构成,即坡面子模型、沟坡子模型、沟道子模型。该模型考虑了降雨入渗、径流剥蚀、重力侵蚀、洞穴侵蚀及泥沙输移等侵蚀过程,从侵蚀机理上对影响侵蚀过程的因子进行定量分析。由于这是一个侵蚀产沙的过程模型,旨在从理论上阐明坡面侵蚀产沙规律,因此模型结构尤其是坡面子模型较为复杂,在推广应用时受到模型参数的限制。同时在沟道子模型中,还是以经验方程为主。邵学军(1998)提出了有细沟和集中水流的坡面上地表流动的一维动力波模型及运动波模型,并对两种模型给出了数值近似解。柳丽英和范荣生(1997)及李清河等(2000)分别从不同角度对坡面侵蚀产沙预报模型进行了分析。

国外对土壤侵蚀的研究是从 18 世纪末到 19 世纪初逐步形成和发展起来的(刘秉正和吴发启,1996)。1877 ~ 1895 年,德国土壤学家沃伦建立了第一个水土保持研究试验区,观测植被及地面覆盖物对防止侵蚀和土壤板结的影响作用,以及坡度对径流、冲刷的影响,之后该方法传入美国、前苏联等国家,并在这些国家得到了进一步的发展(刘秉正和吴发启,1996)。但这些研究大多是应用研究,基本上是经验性的。关于土壤侵蚀机理

的基础研究是从20世纪40年代逐步开始的。Zingg于1940年给出了第一个关于片蚀和细沟侵蚀的预报模型。从20世纪50年代中期开始,美国开展了一系列更广泛、细致和系统的研究项目,使土壤侵蚀的定量研究出现了一个崭新的局面。1956年,Wischmeier和Smith等(Franti et al., 1999)利用国家水土流失中心收集到的资料,包括美国21个州、35个地区和200多个小区的6500场暴雨资料,8250个小区的每年土壤侵蚀资料和2500个每年降雨冲刷模拟数据,在对各因素不同排列组合进行多重回归分析和系统研究后,提出了土壤通用流失方程USLE,并于1965年正式发布,这是一个基于因子的方程。他借助现代化的数理统计分析方法,把美国所有田间试验小区的结果关联起来,通过降雨因子、坡长因子、坡度因子、作物覆盖与经营管理因子以及土壤保持措施因子等6个因子的连乘形式来表示土壤的流失量。该方程包括了影响坡面土壤侵蚀的主要因素,侵蚀模型形式统一,从而在世界各国得到广泛应用。但模型中仍然存在很多不足,其数据库是基于美国洛基山脉以东地区,主要适用于蒙托土壤缓坡地。USLE方程没有考虑泥沙的输移与沉积,模型中互相作用的变量重复计算,而其他因子间的交互作用则被忽略,且与土壤侵蚀密切相关的径流因子未包含在方程之内。因此,1987年美国农业部的农业研究局(ARS)、土壤保持局(SCS)和其他几个部门开始合作对USLE进行改进,修订工作于1997年完成,并将模型更名为修正通用土壤流失方程RUSLE(Renard and Foster, 1991; Tiwari et al., 2000)。

目前,研究土壤侵蚀最好的经验模型为通用土壤流失方程及其修订版RUSLE(Tiwari et al., 2000)。RUSLE仍然保留了USLE的所有因素,而在应用过程中,各因素的计算方法有了一定的改进。RUSLE与USLE相比最大的优点在于它用计算机软件编制成了计算机模型,而且还可以用于非农业地区。RUSLE主要有以下几个特点:①数据处理计算机化,设计的计算机程序能在个人计算机的DOS和UNIX操作系统下进行工作;②新的降雨-径流侵蚀因子 $R$ 值表明了不同气候条件下的侵蚀性,其值的大小及季节性分布与农作物的轮作制度联系起来。 $R$ 因子的另一个变化是,由于暴雨雨滴击溅在有层流的地表时侵蚀力降低,在长历时、高强度暴雨地区的平缓坡面上其值减小;③提出了随季节不同而发生变化的土壤可蚀性因子 $K$ ;④使用不同亚因子值计算植被因子 $C$ ;⑤新的坡长 $L$ 、坡度因子 $S$ 反映了细沟侵蚀和细沟间侵蚀的比率,也反映了不同形状的坡面;⑥新的土壤保持措施因子 $P$ 反映了草地和农地的轮作制度、等高耕作情况和土壤亚表层排水情况。方程的优点在于形式简单且所需参数易于获取。但这种经验模型的不足在于它不能反映实际数据的变化趋势,相互作用的变量重复计算,而其他因子间的交互作用则被忽略,如雨强大的地区坡度的相对重要性,与土壤侵蚀紧密相关的一个因素——径流未包括在方程之内。该方程多用于土地利用规划与评价,由于不能预报土壤侵蚀的时空分布,对于水土流失防止措施的选取并不能起到应有的指导作用。这些不足的存在使得侵蚀机制的研究越来越侧重于侵蚀过程的深入研究。

经验模型仅能够预报特定区域一段时间的总产沙量,无法知道侵蚀过程中相关因素的变化过程。随着侵蚀动力学过程的不断深入,越来越多的学者从动力学角度出发,建立了基于物理过程的动力学模型。土壤侵蚀过程模型是在对土壤侵蚀机理与过程理解的基础上所构造的数学模型,为定量评价土壤侵蚀强度及其时空分布提供必要手段,



是进行土地利用和土壤侵蚀防治规划,以及工程设计的基础。1947年,Ellison(1947 a, b, c, d)将土壤侵蚀划分为降雨分离、径流分离、降雨输移和径流输移4个基本的侵蚀过程, Meyer和Wishmeier在1969年对这4个基本子过程分布进行了定量描述。物理过程模型最早出现于20世纪60年代,是从产沙、水流汇集及泥沙输移的物理概念出发,利用各种数学方法,把气象学、水文学、水力学、土壤学和泥沙运动力学的基本原理结合起来,经过一定的简化,以数学的形式总结出土壤侵蚀过程与影响因子的联系,以模拟各种不同形式的侵蚀,预报土壤在时间和空间的变化。直到20世纪60年代末, Meyer和Wishmeier(1969)根据已有的土壤侵蚀知识,创建了一个基于物理过程的预报模型框架(process-based technology)。但因为当时的数据库不完备,加上当时计算机能力不足,该模型一直未实际应用。Meyer和Wishmeier(1969)提出的侵蚀与输移量的过程模型将坡面水蚀过程分成4个子过程,并建立了4个子过程的定量关系,但方程中各指数是根据侵蚀过程的研究和理论探讨确定的。1972年, Foster和Meyer(1972a, 1972b)根据侵蚀泥沙的来源将坡面侵蚀划分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀,并在近似稳定条件下,依据泥沙输移连续性方程建立了坡面侵蚀泥沙连续方程,从而为建立基于土壤侵蚀过程的土壤侵蚀动力学模型发展奠定了理论基础。

1985年开始,美国农业部着手了10年的研究项目,目的是开发能代替USLE的土壤侵蚀预报模型。1986年,4家政府部门(农业部农业研究局、土壤保持局、林业局,内政部土地管理局)签署了为期10年开发新一代侵蚀模型的项目——水蚀预报项目(water erosion prediction project, WEPP)(Nearing et al., 1989; Flanagan et al., 1995)。1987年完成了用户需求报告,规定了WEPP的基本框架,WEPP模型应具备以下3个版本:坡面版、流域版和网格版。WEPP流域版的工作从1990年开始。流域版作为坡面版的扩展,用于预报流域径流与土壤侵蚀过程,评价流域内地形、土壤特征、土地利用和农业管理措施对土壤侵蚀的影响。第一个版本于1990年完成,以后做了进一步的改进。1995年8月在依阿华州(Des Moines, Iowa)举行的WEPP和WEPS(wind erosion prediction project, 风蚀预报系统)学术讨论会上发布了第一个官方正式版本WEPP 95,完成了坡面版和流域版,但没有完成网格版。该版本包括以下3个基本部分:坡面、渠道和蓄水池。渠道部分又可划分为水文和侵蚀两部分。渠道水文部分计算入渗、蒸发蒸散、渗透、植被截留降雨量、地表蓄水及洪峰流量。渠道侵蚀部分计算泥沙量,包括坡面上和渠道中的剥离、搬运与沉积。由于WEPP是过程模型,所以比原有侵蚀预报模型具备明显优越性,主要包括:①估算土壤侵蚀的时空分布即全坡面或坡面任意一点的净土壤流失量及随时间的变化。②作为过程模型它可以应用于更广泛的条件下(Nearing et al., 1989)。

WEPP的核心是基于坡面在不同土壤、管理方式、气象条件下的水蚀过程,而其流域规模的应用只是在空间上对每个坡面的集成(刘宝元和史培军,1998)。WEPP坡面版可以直接代替USLE,但比USLE的功能更强。自然资源保护局主要将其应用于资源保护规划和项目规划。流域版可以评价和指导资源管理系统,以保证流域侵蚀速率小于允许侵蚀速率,维持土地生产力。在项目的计划中,流域模型常常作为一个技术工具用于下述几方面:①决定流域侵蚀控制的方法及其贡献;②模拟流域产沙量和泥沙特征为渠道和蓄水设施设计提供资料;③估算泥沙产量和特征,分析对下游水质的影响。土地管理局