



THE DYNAMIC MODEL OF
SOIL EROSION AND SEDIMENT
TRANSPORT IN RIVER BASINS

流域泥沙动力学模型

王光谦 李铁键 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

流域泥沙动力学模型

王光谦 李铁键 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 介 绍

为了研究区域与流域尺度下包括侵蚀—输运—沉积的泥沙运动全过程,需要建立流域泥沙科学体系,对应于河流泥沙的学科内容,流域泥沙的相关研究应包括三部分:流域泥沙动力学、流域泥沙过程模拟和流域演变学。本书通过分析流域泥沙过程的主要影响因素和物理机理,初步完成了流域泥沙动力学的模型和模拟方法。

本书以黄土高原丘陵沟壑区为例,将其中发生的泥沙过程分解为坡面产流产沙、沟坡区重力侵蚀、沟道水沙演进等不同子过程,分别建立了相应的动力学模型,并以数字流域为平台进行了集成。将模型应用于黄河多沙粗沙区,模拟结果能够显示侵蚀—输运—沉积在流域内的分布情况,反映主要影响因素对流域泥沙过程的作用方式。将多沙粗沙区的产输沙模拟与黄河中下游河道的水沙动力学模拟耦合,能够分析水沙源区的来水来沙条件与干流河道间的水沙响应关系。

本书尝试在区域与流域尺度完成了对包括流域面与河网在内的流域泥沙全过程的基于物理机理的分析与数学模拟,吸收地表水文过程、土壤侵蚀、高含沙水流运动,以及水土保持和流域地貌学等多个学科方向的成果,力求解释流域泥沙过程中的主要科学问题,为黄河水沙过程预报提供科技支撑。

全书分12章。第1章绪论,综述国内外研究进展和本书研究范围。第2章至第4章讨论了流域泥沙动力学的基本过程和机理。第5章至第7章分别介绍了流域泥沙主要子过程的模拟方法,包括坡面产流产沙、沟坡区重力侵蚀和沟道水沙演进模型,并在第8章简明了模型的集成方式。第9章是模型在黄河多沙粗沙区验证和应用的结果,随后第10章对流域泥沙过程的规律作进一步分析。第11章介绍了河道水沙动力学模型基本原理、集成方法和应用结果,第12章进行了水沙源区与干流河道间的水沙响应分析。

本书对从事水利、地理、环境、农业等专业工作的研究人员具有参考价值,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

流域泥沙动力学模型/王光谦,李铁键著. —北京:中国水利水电出版社,2009

ISBN 978-7-5084-6303-2

I. 流… II. ①王…②李… III. 流域-泥沙运动-流体动力学-研究 IV. TV142

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第032482号

书 名	流域泥沙动力学模型
作 者	王光谦 李铁键 著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13印张 292千字
版 次	2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	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

泥沙的侵蚀、搬运、沉积是一个整体。河流泥沙来源于流域泥沙，流域环境决定着进入河流的水沙条件，而水沙条件变化又进一步影响河床演变过程。以前泥沙研究的重点在河流输沙与冲淤上，而对流域面上的侵蚀产沙重视不够。河流来水来沙条件是通过流域水土流失研究，利用原型观测和经验方法得出的。这方面的研究有较大的局限性，至今还处于小流域的经验估算阶段。因此，加强流域泥沙研究，从根本上揭示流域产流产沙与河床演变及江河治理的关系很有重要意义。

钱宁院士最早开展流域来水来沙与河床演变关系的研究。在 20 世纪 70 年代，他通过观察黄河下游河床粗泥沙淤积现象，认识到黄土高原粗泥沙来源对黄河下游河床淤积抬升起主要作用，并初步划分了黄土高原多沙粗沙来源区的范围，为黄土高原水土流失的治理指明了方向。我在黄河综合治理国家“八五”科技攻关项目中承担了“拦减粗泥沙对黄河河道冲淤变化的影响”的课题，对黄土高原自然地理条件、土壤侵蚀和输沙特性开展研究，揭示了来水来沙减少对下游河床冲淤和演变的影响规律。这些成果是基于对水文资料分析和河流水沙模型计算得出的，也需要从流域泥沙角度深入研究河流来水来沙与河床演变的响应关系。

本书作者王光谦和他带领的团队在国家自然科学基金的支持下开展流域水沙过程与调控机理研究，在流域泥沙动力学过程机理、数字流域模型、黄河水沙调控等方面取得了系统的成果。本书是作者关于流域泥沙过程规律、理论描述、模拟方法及实际应用成果总结。

本书的特点是把理论与黄河流域水土流失的特点和难点紧密结合。黄土高原沟壑区地形破碎、土层深厚、结构疏松、植被稀少、暴雨频繁，水土流失严重。特别是面积达 7.86 万 km^2 的多沙粗沙区，沟深坡陡，沟壑密度高，是黄河泥沙的主要来源区与重点治理区域。针对这一区域开发的流域泥沙动力学模型填补了黄土高原区域级产流产沙计算预报的空白。

本书的学术与应用价值在于，结合黄土高原沟壑区特点，划分出流域泥沙的四个过程，即坡面产流产沙、沟坡重力侵蚀、沟道高含沙水流及河道输沙过程，并对每个过程建立动力学模型，最后集成在数字流域平台上，弥补了过去产沙计算中“算沙不算水”的不足，耦合了流域水沙过程与河床演变响应，完成了流域泥沙的全过程模拟。对黄河多沙粗沙区产流产沙计算分析说明了模型的先进性和重要的应用潜力。本书的成果代表着流域泥沙研究的新进展。

流域泥沙是对河流泥沙的拓展。王光谦在 2005 年第六届全国泥沙基本理论学术讨论会上做了“从河流泥沙到流域泥沙”的大会报告，通过对黄河流域的泥沙分析，说明实现从河流泥沙到流域泥沙研究的实际意义，推进了流域泥沙研究。从那时起，流域泥沙研究得到较大进展，到 2008 年第七届全国泥沙基本理论学术讨论会时，把“从河流泥沙到流域泥沙”作为大会的主题，集中展示了该方面取得的成果。看到泥沙学科的不断发展和年轻人的成长，是令人十分欣慰的。

张 仁

2008 年 12 月于清华园

传统泥沙学科研究三方面的基本内容，即河流动力学、河流模拟和河床演变学。这三方面内容体现了对河流泥沙运动的理论、模拟方法及宏观规律的完整描述，也是河流泥沙学科相对成熟的标志。这些研究多集中于河道内泥沙运动规律及水沙响应关系，应用于干流河道。然而，河道内的水沙响应在很大程度上是以流域面上的水沙过程为输入条件的，这些水沙输入受控于气候气象、地质地貌、植被覆盖、地表水文、土壤侵蚀等诸多因素的作用，时空变化规律非常复杂，这是流域泥沙研究的内容，也是对河流泥沙研究的拓展。

在区域与流域这一较大的尺度上，以泥沙为主要对象，将流域面与河道作为整体考虑的相关研究较少出现。水文学科的水文模拟以流域内的水循环全过程为对象，但传统的水文模型往往忽略与泥沙过程相关的部分机理，而使土壤侵蚀仍然是相对独立的学科。WEPP 和 EUROSEM 等基于物理机理的侵蚀模型的出现，可以看作是水文学科与土壤侵蚀研究结合的进展，但这些模型在大空间尺度和复杂物理机理的条件下应用仍然存在一定的困难。从泥沙研究的角度看，我们一方面希望这些成果能够作为河流动力学与河床演变学研究的输入条件；在更高的层面上也期待水文过程和土壤侵蚀的研究中包含更多的动力学机理，从而与河流泥沙研究集成在一起，实现“从河流泥沙到流域泥沙”这一新的学科发展，这正是本书的初衷。

作为《流域泥沙动力学模型》，在编写中注重了以下几个方面。首先，研究的空间范围与尺度是流域。流域范围是包括流域面和河道的总体；流域尺度是较田间、小区和小流域更大的区域。本书的内容因此与地表水文过程、土壤侵蚀和流域地貌学存在较多的交叉和综合。其次，研究的对象是泥沙，并包括其产生—输移—沉积的整个周期，需要考虑影响其不同子过程的诸多因素。再者，我们希望本书的模拟方法能够建立在流域泥沙动力学基础之上，并尝试采用模拟结果对流域泥沙规律进行分析。

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地，蜿蜒东流，以几字形转弯穿越黄土高原，之后东流入海。黄河多年平均输沙量 16 亿 t，其中 90% 以上来自于黄土高原地区。黄土高原内发生的严重土壤侵蚀与水土流失，一直以来都是造成区域内土壤贫瘠、环境恶化、下游淤积严重、水患灾害频发的主要原因。其中多沙粗沙区是黄河下游粗泥沙的主要来源区，对黄河治理具有重要价值，且其水沙过程复杂而具有典型意义，因此被选作为本书研究的背景区域。

将黄土高原的复杂地貌概化为坡面与沟道两部分，分析不同地貌部位上的产输沙子过程，分别建立坡面产流产沙模型、沟坡区重力侵蚀模型和沟道水沙演进模型，并在黄河中下游干流应用水沙动力学模型。这些模型在数字流域平台上集成，以坡面—沟道作为基本计算单元，最终完成了对全流域泥沙过程的分布式模拟。模拟结果能够显示侵蚀—输运—沉积过程在流域内的分布情况，能够反映主要影响因素对流域泥沙过程的作用方式。本书还根据这些模拟结果分析了流域泥沙过程的一些变化规律。

相关研究和本书的出版得到了国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水沙过程与临界调控机理 (50221903)”和国家科学技术学术著作出版基金项目的资助，在此表示感谢。

参加本书编写和相关研究的主要人员除署名作者外，还有薛海（第 5 章、第 6 章、第 9 章），贺莉（第 11 章、第 12 章），王皓（第 8 章）等。

由于作者水平有限，书中难免出现疏漏，敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 10 月

于清华大学

从雨滴降落到地面打击土壤起,土壤侵蚀就开始发生,之后被剥离的土壤作为泥沙随水流运动,历经坡面、细沟、逐级沟道和河道,并由沿程冲刷和淤积补充或削减,最终到达河口进入海洋。泥沙从在地表被剥离到进入海洋的这个运动周期在一个流域中是连续的物理过程。流域泥沙动力学指包括流域面的土壤侵蚀和不同级别沟道河道的泥沙运动在内的流域内泥沙产生、输移和沉积的连续全过程的动力学理论体系与模拟方法。本书以黄河中游多沙粗沙区为例,采用基于动力学的分析与建模方法,建立了模拟流域内泥沙运动全过程的模型系统。

首先,借鉴相关学科已有成果,针对多沙粗沙区的特点,对流域泥沙动力学过程进行描述,对其机理进行分析。指出区分不同地貌组成和侵蚀产沙过程,分别建立相应模拟模型并合理集成是完成具有动力学意义的泥沙过程模拟的基础。在所研究区域,这些模型应包括坡面产流产沙模型、沟道水沙演进模型和重力侵蚀模型等。

将坡面作为基本单元建立了以描述超渗产流过程为主的降雨径流模型,建立并验证了一个基于过程的坡面土壤侵蚀模型。这个土壤侵蚀模型将地表径流作为侵蚀过程的驱动力,考虑了水流强度、土壤可蚀性和微地貌形态的影响。建立了模拟沟坡区土体滑坡和崩塌过程的重力侵蚀模型,用于根据降雨和水流影响下的土体力学稳定状况模拟重力侵蚀的可能性和侵蚀量。为计算无断面资料沟道中的水流演进和泥沙冲淤过程,提出了采用扩散波方法和悬移质不平衡输沙模式的沟道水沙演进模型。

为使这些模型按水沙运动的顺序集成运行,并提供其在流域尺度应用时需要的计算能力,提出了一种基于二叉树的树状河网编码方法,在其基础上实现了计算机集群上的流域并行计算,最终将这些功能和模型集成在数字流域平台上。

将模型在流域中率定和检验,证明了其模拟流域水沙过程的有效性,并得到了坡面侵蚀、重力侵蚀和沟道侵蚀在流域中的分布及三者的比例关

系。进一步，使用模型模拟结果初步解释了流域泥沙过程中尺度现象的形成原因，指出重力侵蚀对尺度现象的贡献较为显著；设定不同降雨情景分析了土壤侵蚀在不同降雨变化下的响应，指出在流域内降雨量减少的情景下，侵蚀量的减少幅度小于径流量减少的幅度。

最后，将一维水沙动力学模型集成到模型系统中，用于完成水沙源区的泥沙过程向中下游干流河道演进的数学模拟，进一步分析水沙源区与干流河道的水沙响应关系，并得到了初步结果。

序
前言
摘要

第 1 章 绪论	1
1.1 研究对象	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 主要侵蚀与水质模型的结构和特点	2
1.2.2 土壤侵蚀公式的主要形式	3
1.2.3 流域土壤侵蚀模拟的进展	3
1.2.4 黄土高原侵蚀产沙研究	4
1.3 研究内容与方法	5
第 2 章 流域泥沙主要影响因子及其过程概化	7
2.1 流域特征因子	7
2.1.1 降水、植被与土壤特征	7
2.1.2 地质地貌特征和河网	8
2.1.3 人类活动影响	9
2.1.4 不同因素间的相互作用	9
2.2 黄土高原的主要特征因子	9
2.2.1 降水特征	9
2.2.2 土壤与土地利用特征	10
2.2.3 植被特征	12
2.2.4 地貌特征	12
2.3 流域不同地貌单元的泥沙子过程	15
2.3.1 黄土丘陵沟壑区的地貌单元组成	15
2.3.2 坡面侵蚀	17
2.3.3 沟坡区重力侵蚀	17
2.3.4 沟道与河道不平衡输沙	19
2.4 黄土高原泥沙过程的模型概化	21
第 3 章 坡面水流特性	23
3.1 坡面漫流	23

3.1.1	坡面漫流的流态	24
3.1.2	坡面流的水力关系	27
3.1.3	坡面流阻力	28
3.1.4	雨滴击溅的影响	29
3.1.5	坡面漫流的计算	31
3.2	有细沟的坡面流	32
3.2.1	细沟水流的实验	32
3.2.2	细沟坡面的水流计算	33
3.3	本章小结	35
第4章	坡面侵蚀机理	36
4.1	雨滴溅蚀	36
4.2	坡面径流侵蚀	38
4.2.1	薄层水流侵蚀	38
4.2.2	细沟水流侵蚀	39
4.3	坡面水流侵蚀和输沙的计算	40
4.3.1	侵蚀量与输沙量的关系	40
4.3.2	薄层水流的侵蚀与输沙能力	41
4.3.3	细沟流的侵蚀与输沙能力	41
4.3.4	模拟中要注意的问题	42
4.4	本章小结	43
第5章	坡面产流产沙模型	44
5.1	超渗产流模型	44
5.1.1	模型的结构与计算流程	45
5.1.2	产流过程计算	46
5.1.3	汇流过程	50
5.1.4	参数取值	50
5.2	坡面产沙模型	51
5.2.1	产沙模型的概化	51
5.2.2	坡面产沙计算公式	51
5.2.3	公式合理性检验	53
5.2.4	公式的适用性	59
5.3	本章小结	61
第6章	沟坡区重力侵蚀模型	62
6.1	沟坡重力侵蚀物理图景概化	62
6.2	沟坡重力侵蚀力学分析	63
6.2.1	土体含水量变化	63

6.2.2	坡脚侧向冲刷计算	64
6.2.3	沟坡失稳几何形态分析	65
6.2.4	沟坡土体受力分析	66
6.3	沟坡失稳的不确定性分析	69
6.3.1	不确定性的含义	70
6.3.2	沟坡失稳的模糊性分析	70
6.3.3	沟坡失稳的随机性分析	72
6.3.4	沟坡失稳的模糊概率	73
6.4	重力侵蚀模型的应用条件	74
6.5	本章小结	75
第7章	沟道水沙演进模型	76
7.1	精确扩散波汇流模型	76
7.1.1	马斯京根—贡日法	76
7.1.2	时空步长的选择	77
7.1.3	水力要素的计算	78
7.1.4	验证与对比	79
7.2	沟道输沙计算	79
7.3	沟道水沙计算的验证	80
7.4	本章小结	82
第8章	流域数字河网和模型集成	83
8.1	河网并行计算需求	83
8.2	数字流域平台的改进与应用	83
8.3	基于二叉树的河网编码方法	85
8.3.1	河网的二叉树特征	85
8.3.2	快速定位节点的二叉树编码	85
8.3.3	基于二叉树的河网编码方法	86
8.3.4	基本拓扑关系	88
8.3.5	典型应用的拓扑算法	88
8.4	大规模河网的管理	90
8.4.1	分区分级编码方法	90
8.4.2	子流域 DEM 切割和河网耦合	91
8.4.3	河网管理的应用	93
8.5	基于河网分解的并行计算	95
8.5.1	并行计算的逻辑架构	96
8.5.2	河网分解算法	97
8.5.3	基于 MPI 和计算机集群的实现方式	98

8.5.4	并行计算应用实例	99
8.6	模型的集成	99
8.6.1	模型集成方法	99
8.6.2	模拟尺度的提升	101
8.7	本章小结	102
第9章	流域泥沙过程模拟	103
9.1	岔巴沟流域泥沙过程模拟	103
9.1.1	计算准备	103
9.1.2	参数率定	105
9.1.3	模型应用	114
9.1.4	结果分析	121
9.2	无定河流域泥沙过程模拟	121
9.2.1	计算准备	121
9.2.2	参数率定	124
9.2.3	模型应用	127
9.2.4	结果分析	130
9.3	多沙粗沙区流域泥沙过程模拟	132
9.3.1	计算准备	132
9.3.2	1967 年模拟结果	132
9.3.3	1977 年模拟结果	134
9.3.4	结果分析	136
9.4	本章小结	137
第10章	水沙源区泥沙过程规律分析	138
10.1	尺度现象及其形成机理	138
10.1.1	尺度现象	138
10.1.2	模拟结果中的尺度现象	144
10.1.3	对尺度现象来源的分析	145
10.2	降雨变化对侵蚀产沙的影响	147
10.2.1	降雨变化趋势和情景设置	147
10.2.2	径流和输沙量结果	149
10.2.3	不同土壤侵蚀组成的变化	150
10.2.4	结果分析	151
10.3	本章小结	151
第11章	河道水沙动力学模型	153
11.1	模型建立	153
11.1.1	控制方程组	153

11.1.2	数值解法	154
11.1.3	关键问题处理	156
11.2	模型率定	158
11.2.1	初始和边界条件	158
11.2.2	高含沙量对模拟结果的影响	160
11.2.3	考虑高含沙量影响的模拟结果	161
11.3	参数敏感性分析	162
11.4	模型应用	165
11.4.1	1982 年洪水	165
11.4.2	1992 年洪水	166
11.4.3	1998 年洪水	169
11.5	本章小结	171
第 12 章	水沙源区与干流河道的耦合模拟	172
12.1	流域与河道模型的耦合方式	172
12.2	模拟实例	172
12.2.1	计算准备	173
12.2.2	计算条件的对比	174
12.2.3	模拟结果	175
12.3	来水来沙变化对河道冲淤的影响	178
12.4	本章小结	181
参考文献		182

第1章 绪 论

流域对降雨响应的一个直接体现就是地表径流,水流沿沟道与河道逐渐汇聚,最终形成大江大河的径流过程,这是水文学研究的范畴。在雨滴降落到地面打击土壤之后,土壤侵蚀开始发生,随后被剥离的土壤作为泥沙随水流运动,并由沿程冲刷和淤积补充或削减,汇入大江大河,最终到达河口进入海洋。泥沙从在地表被剥离到进入海洋是一个连续的物理过程,但还没有相关的研究和模型对其进行全过程模拟。相关理论与建模分别属于土壤侵蚀和河流泥沙等学科分支,这两个学科分支的研究对象在流域中所处的部位、关注的时空尺度和采用的研究方法是不同的。对流域泥沙产生和运动的全过程进行机理分析和过程模拟需要借鉴、融合和发展这两个学科的研究成果,建立流域泥沙动力学理论体系和相应的数学模型系统。

本章首先明确研究对象,之后从国外主要土壤侵蚀与流域水文模型的结构和特点,以及国内关于黄土高原土壤侵蚀与泥沙研究的现有成果等方面对相关研究基础进行简略回顾,最后说明本书的研究内容和方法。

1.1 研究对象

流域泥沙动力学指包括流域面的土壤侵蚀和不同级别沟道与河道的泥沙运动在内的流域内泥沙产生、输移和沉积的全过程的动力学理论体系与模拟方法。其中“流域泥沙”指的研究对象是从被剥离到落淤的全周期的泥沙,其运动过程覆盖包括坡面、沟道及河道在内的流域总体,而不是仅偏重其中的一部分。另外还表明了研究对象的空间尺度,即分析和模拟的空间范围是区域和流域级的。对研究对象的分析和模拟手段区别于统计分析或因素相关的方法,采用基于动力学的分析方法,建立能够模拟从坡面侵蚀开始,经沟道、河道的逐级运移输送,包括冲刷、淤积与重力侵蚀等过程,直至排出流域的泥沙产生和运动的全过程模型系统。

基于物理机理的分析与建模方法和流域水沙响应的时空变异要求以较高的分辨率刻画研究对象,又由于研究对象空间范围很大,造成了模型建立和运行的信息量与计算量显著增加。即,从模型对研究对象的描述来看,模型化的研究对象是计算机系统中由海量数据和运算能力组成的数字流域。

黄土高原多沙粗沙区是黄河泥沙的主要来源区,严重的水土流失一方面影响着当地的生态环境和工农业生产;另一方面进入黄河干流的大量泥沙给中下游防洪安全、骨干水库运用和下游河势造成了不良影响。因此,多沙粗沙区和黄河中下游河道一直是中国土壤侵蚀和泥沙研究的重点,将其作为本书分析和模拟的背景区域。

多沙粗沙区特定的降雨、土壤、地貌、土地利用、植被等要素及其组合使区域内的

流域泥沙动力学机理复杂而独特,许多现象和科学问题仍然没有得到定量解释。如人类活动对多沙粗沙区的水沙条件究竟产生了何种程度的影响,气候变化条件下多沙粗沙区的水沙条件将向何种趋势发展等。以多沙粗沙区中的流域为对象,将流域泥沙过程的模拟结果用于定量重现、解释和剖析其中的自然现象,尝试回答一些科学问题,是本书模型检验的途径和应用的目标。

1.2 研究现状

作为流域泥沙过程模拟研究基础的相关领域主要包括水文学与水文模拟、土壤侵蚀、泥沙运动力学等方面,但其中的任何一个都不能通过简单扩充达到建立流域泥沙过程模拟模型的目标。水文模型主要考虑水的地表循环过程,土壤侵蚀模型往往只适用于小的空间尺度或长时间段的统计平均,而河流动力学理论仅限于在干流河道中的应用,受限于实测资料和高含沙水流的特殊规律,难以应用于小级别的沟道。

学科的交叉与融合和信息技术手段的进步使水文模型、水质模型、土壤侵蚀模型和水沙动力学模型能够整合在一起,形成定位不同的“流域模型”软件系统,具有一定的流域侵蚀产沙预测功能,是流域泥沙过程模拟需要借鉴的方面。

1.2.1 主要侵蚀与水质模型的结构和特点

USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1978) 是土壤侵蚀模型的一个里程碑。20 世纪 80 年代之后,不同研究机构和学者进行了开发比 USLE 更为全面和有效的水蚀预报与水质模型的努力。在美国,这类模型主要由农业部 (USDA) 完成,包括 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1997), GLEAMS (Groundwater Loading Effects from Agricultural Management Systems, Leonard et al., 1987), EPIC (Environmental Policy Integrated Climate, Williams et al., 1990), AGNPS (AGricultural NonPoint Source model, Young et al., 1989) 和 WEPP (Water Erosion Prediction Project, Flangan and Nearing, 1995) 等模型。

在 USDA 的这些模型中, RUSLE 是 USLE 模型的改进版本,仍然采用不同因素值乘积的经验形式。而 GLEAMS 被认为是一个基于物理机理的数学模型,用以在田间尺度上评价作用于植被根系区的农业管理措施的作用。GLEAMS 采用 SCS 径流曲线 (SCS curve numbers, Williams and LaSeur, 1976) 计算日径流量,其土壤侵蚀模块出自于农业耕作制度下化学径流和侵蚀评价模型 CREAMS (field-scale model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, Knisel, 1980)。CREAMS 以降雨场次作为计算的时间步长,以降雨—径流的统计特征为变量对土壤侵蚀和泥沙输运分别建立计算式,并区分了坡面、沟道和地表蓄滞不同单元形式。

土壤侵蚀和生产力影响估算模型 EPIC 的功能被 USDA 定位于农田生产管理和水土资源评价。这个模型也采用 SCS 径流曲线计算径流量,提供了包括 USLE 在内的不同经验型土壤侵蚀公式计算水力侵蚀量。这个模型的特点在于它是一个基于“气候—土壤—

作物—管理”综合连续系统的动力学模型，对与农业生产相关的各方面考虑比较全面。

农业非点源模型 AGNPS 以农业用地的非点源污染为模拟目标，采用栅格单元，也采用 SCS 径流曲线计算径流量，采用 USLE 模型计算土壤侵蚀量。作为改进的 AnnAGNPS (Annualized AGNPS, Bingner and Theurer, 2005) 为连续模拟模型，且改用坡面—沟道形式的单元划分和 RUSLE 模型，并按水流输沙能力计算沟道内的不平衡输沙。

USDA 将水力侵蚀预报模型 WEPP 作为其开发的“新一代”水蚀预报模型。这是一个基于过程的分布式模型，区分了坡面、沟道和地表蓄滞单元。在径流模拟方面，它采用 Green-Ampt 方程计算地表入渗，采用运动波方法计算坡面水流，采用 CREAMS 或 EPIC 中的方法计算沟道径流。WEPP 模型区分了坡面的沟间侵蚀和细沟侵蚀，采用了具有物理基础的计算公式，且能够计算泥沙运动的冲淤过程。

欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model, Morgan et al., 1998) 是一个基于过程的动力学模型。它基于动力侵蚀模型 KINEROS (Woolhiser et al., 1990) 的部分基础，区分坡面和沟道单元，采用分钟级的时间步长，按照完全的水文过程机理模拟径流过程，区分雨滴溅蚀、沟间侵蚀和细沟侵蚀，分别计算土壤侵蚀和不平衡输沙过程，被开发者认为尽可能多地考虑了当时已知的水沙过程细节。

欧洲其他具有影响力的土壤侵蚀模型还有流域环境非点源响应模型 ANSWERS (Dabral and Cohen, 2001)，林堡土壤侵蚀模型 LISEM (De Roo et al., 1996) 和 SHE 模型的泥沙模块 SHESED (Wicks and Bathurst, 1996) 等。

1.2.2 土壤侵蚀公式的主要形式

USLE 形式的模型以降雨特征、土壤可蚀性和农业管理措施等为主要变量计算年尺度至场次降雨的侵蚀量，通过计算降雨动能和 30min 雨强的乘积 EI_{30} 获得降水侵蚀力因子 R 表示降水对土壤侵蚀的驱动力，其中同时考虑了降雨量和雨强因素。这种形式的土壤侵蚀模型应用广泛，在很多地区都有经过率定和验证的实例，在 EPIC、AGNPS/AnnAGNPS 等模型和 West (1999)、Yang et al. (2003)、Asselman et al. (2003) 等的研究中被采用。总的来说，这类模型形式简单，计算方便，但无法预测侵蚀发生的详细过程。

WEPP、EUROSEM、LISEM、ANSWERS 等模型采用基于过程的土壤侵蚀公式，涉及径流对土壤剥离速率的计算，采用了不同的物理机理较强的定量形式。但这些定量方法往往认为土壤剥蚀速率受限于实际输沙率与输沙能力之间的差距，这个差距越小，土壤剥离速率越小，不能反映陡坡条件下高含沙水流对土壤侵蚀的增强作用。还注意到，区分细沟侵蚀和沟间侵蚀的模型在高可蚀地区应用时，判断细沟间距等参数成为了比模型本身更困难的问题，从而使其难以在黄土高原直接应用。

1.2.3 流域土壤侵蚀模拟的进展

流域土壤侵蚀模拟越来越多地强调其物理机理，这些研究一方面对土壤剥离和泥沙