



流域水沙过程 及其耦合模拟研究

龚家国 贾仰文 刘佳嘉 等/著
王 英 张海涛 杨 苗



科学出版社

流域水沙过程及其耦合模拟研究

龚家国 贾仰文 刘佳嘉 王 英 张海涛 杨 苗 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以流域水沙过程尺度效应研究为基础,采用 WEP-L 模型平台,建立基于过程的流域分布式水沙耦合模型,研究水沙耦合模型的尺度效应,模拟泾河流域不同人类活动情景下水沙过程演变的规律。全书共分 8 章,包括绪论、黄土区坡面水沙过程研究、流域水沙过程尺度效应及其机理分析、分布式水沙过程耦合模拟原理与建模技术、流域水沙过程模拟模型及其过程参数率定、分布式水沙耦合模型应用中的尺度问题研究、人类活动对流域水沙过程影响的模拟分析和总结与展望。本书阐述的流域水沙过程及其模拟研究成果具有很好的学术和实践价值,在支撑流域水土保持措施科学配置、建立科学的水土保持体系、正确评估水土保持措施效益等方面具有较高应用价值。

本书可供水土保持和水资源方面的科研、生产与管理人员阅读参考,也可作为高等院校相关专业教师、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流域水沙过程及其耦合模拟研究 / 龚家国等著. —北京:科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-059248-4

I. ①流… II. ①龚… III. ①流域-含沙水流-研究 IV. ①TV131.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 241932 号

责任编辑:张 菊 / 责任校对:郑金红
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 280 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流域水沙过程是地球形成以来最重要的自然过程之一，对流域内的水分、植被、生态及人类的生产生活具有重要影响。黄土高原地区因其独特的自然地理条件，成为我国乃至世界水沙问题最严重的区域。目前，坡面水沙过程机理认识不完善及流域水沙过程尺度效应等问题已成为流域水沙过程研究的瓶颈。同时，随着模型技术的不断发展，对流域水沙过程研究的不断深入，以及生态治理和区域水沙过程管理等实践需求的不断增加，流域水沙过程模拟已发展到以基于过程的分布式模型为研究重点的阶段。

本书以流域水沙过程尺度效应研究为基础，通过完善坡面水沙过程模拟研究，以 WEP-L (water and energy transfer process in large river basins) 模型为平台，建立基于过程的流域分布式水沙耦合模型，并对水沙耦合模型的尺度效应进行初步研究；同时，应用该模型对泾河流域不同人类活动情景下水沙过程演变进行模拟分析。主要的研究结论和创新点如下。

1) 以尺度分析角度，从地形和水动力学条件两方面对“面（片）蚀—细沟侵蚀—浅沟侵蚀—切沟侵蚀”这一典型坡面水沙过程进行研究，指出黄土高原复杂的坡面水蚀过程是坡面产汇流过程中地形和下垫面状况影响下的水流能量尺度变化过程，其本质是水流侵蚀输沙特性的非线性转变。并结合大尺度研究得出，在小尺度条件下水流侵蚀输沙主要受水流侵蚀能力的影响；随着尺度逐渐增大，水流的侵蚀输沙主要受水流挟沙能力的影响；尺度进一步增大后流域输沙率主要影响因素逐渐弱化为上游来水量。因此，在黄土高原地区的水土保持治理过程中，在较小尺度上应注重坡面径流消能，而较大尺度上应注重从减少地表径流量、改变河道径流结构的角度进行配置和治理。

2) 以室内外试验资料为基础，对黄土区坡面股流侵蚀的主要类型——浅沟侵蚀进行了研究，建立了基于单位水流功率概念的坡面股流侵蚀挟沙方程；从流域水沙过程的角度，提出了基于非饱和黄土抗剪强度变化规律的重力侵蚀模拟方法，并通过野外试验研究了自然条件下 Q_3 黄土抗剪强度变化规律，从而构建了物理机制相对完善的坡面水沙过程模拟模型。

3) 以 WEP-L 模型为平台，构建了基于过程的分布式流域水沙耦合模型。在杨家沟和董庄沟小流域进行模型参数率定的基础上分析发现，两个小流域均表现

出明显的非平衡输沙特点。在泾河流域和南小河沟流域的适应性研究表明,模型对不同尺度流域水沙过程的模拟均有良好的适应性。

4) 以 1956~2000 年泾河流域降水等自然情景为基础,采用情景分析方法初步研究了不同时期下垫面变化及水土保持等人类活动对泾河流域水沙过程的影响。结果发现:①2000 年下垫面情景与 1985 年下垫面情景比较表明,1956~2000 年降水等情况下,人类活动使流域加速侵蚀的状况得到一定程度的缓解,但未彻底扭转,需要进一步加大水土保持治理力度,从根本上扭转人类活动造成流域加速侵蚀的状况;②2000 年梯田、坝地等水土保持工程状况在 1956~2000 年降水等自然情景下的多年平均减水效益和减沙效益分别为 1.0 亿 m^3 、0.22 亿 t。

这些研究成果不仅在流域水沙过程研究、尺度问题解决等科学问题上具有重要意义,而且在支撑流域水土保持措施科学配置、建立科学的水土保持体系、正确评估水土保持措施效益等方面具有重要作用。但流域泥沙过程机理复杂,非线性特点突出,还需从基础研究和应用研究两方面对流域水沙过程尺度效应及分布式水沙耦合模型进行深入探讨。

本书的研究得到国家自然科学基金青年基金项目“黄土区坡面水沙过程空间异质性及其尺度效应研究”(51209222)和国家自然科学基金面上项目“黄土高原水沙过程尺度效应与模拟”(50709041)等项目的资助。

由于作者时间、水平所限,书中疏漏不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

龚家国
2018 年 11 月

| 目 录 |

第 1 章 绪论	1
1.1 流域水沙过程研究背景	1
1.2 流域水沙过程研究进展	2
1.2.1 水文模型研究进展	2
1.2.2 流域泥沙过程研究进展	3
1.2.3 水沙过程尺度效应研究进展	13
1.3 研究中存在的问题	15
1.4 研究内容与方法	16
1.4.1 研究内容	16
1.4.2 研究方法	17
第 2 章 黄土区坡面水沙过程研究	18
2.1 坡面侵蚀链理论	18
2.2 雨滴溅蚀过程	18
2.3 面（片）蚀过程试验研究	19
2.3.1 面（片）蚀过程临界条件	19
2.3.2 坡面薄层水流滚波特性研究	19
2.4 沟蚀过程试验研究	22
2.4.1 细沟侵蚀过程临界条件	22
2.4.2 浅沟侵蚀过程临界条件	23
2.4.3 浅沟侵蚀速率受侵蚀影响因素影响研究	24
2.4.4 浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学特性研究	28
2.4.5 股流侵蚀挟沙能力研究	29
2.5 坡面重力侵蚀发生的力学机制初探	32
第 3 章 流域水沙过程尺度效应及其机理分析	34
3.1 坡面水沙过程尺度效应分析	34
3.1.1 坡面水蚀过程及其尺度效应分析	34
3.1.2 坡面重力侵蚀及其尺度效应分析	35
3.2 流域降雨-径流-泥沙过程中的尺度规律分析	38

3.2.1	研究流域水文相似性比较	38
3.2.2	降雨-径流过程空间尺度效应分析	43
3.2.3	降雨-径流过程空间尺度效应机理分析	45
3.2.4	不同尺度流域水沙过程尺度效应及其机理分析	46
3.3	本章小结	50
第4章	分布式水沙过程耦合模拟原理与建模技术	52
4.1	分布式水沙过程模拟原理	52
4.1.1	WEP 模型及其发展	52
4.1.2	自然水循环过程模拟	52
4.1.3	能量循环过程模拟	66
4.1.4	流域泥沙过程模拟	68
4.2	分布式建模技术	79
4.2.1	河网提取算法改进	79
4.2.2	子流域编码算法改进	88
第5章	流域水沙过程模拟模型及其过程参数率定	105
5.1	模型的搭建	105
5.1.1	基础信息采集	105
5.1.2	前处理	106
5.1.3	模型参数率定与验证	108
5.2	评价方法与指标	108
5.3	研究区介绍	109
5.4	薄层水流侵蚀模型基本参数的率定	111
5.4.1	资料与方法	111
5.4.2	结果与分析	115
5.4.3	小结	118
5.5	小流域水沙过程参数率定与分析	118
5.5.1	资料与边界条件设定	119
5.5.2	参数估算与率定	127
5.5.3	小流域侵蚀过程分析	133
5.5.4	不同坡面侵蚀过程对流域水沙过程的影响分析	137
5.5.5	小结	139
5.6	本章小结	139
第6章	分布式水沙耦合模型应用中的尺度问题研究	141
6.1	分布式水沙耦合模型相关尺度问题研究	141

6.1.1	DEM 栅格大小对模型基本地形参数提取的影响	141
6.1.2	子流域套等高带结构对下垫面要素信息处理的影响	152
6.2	模型在小尺度流域上的应用	154
6.2.1	数据及其利用	154
6.2.2	模型的率定与验证	157
6.3	模型在大尺度流域上的应用	164
6.3.1	研究区介绍	164
6.3.2	数据及其利用	165
6.3.3	模型的率定与验证	171
6.4	模型参数在不同尺度流域上的变化分析	179
6.5	本章小结	181
第 7 章	人类活动对流域水沙过程影响的模拟分析	183
7.1	流域土地利用变化和水土保持措施	184
7.1.1	土地利用数据及其处理	184
7.1.2	水土保持数据及其处理	185
7.2	情景设置	186
7.3	人类活动对泾河流域水沙过程演变的影响分析	187
7.4	本章小结	191
第 8 章	总结与展望	193
8.1	主要结论	193
8.1.1	理论研究	193
8.1.2	应用研究	195
8.1.3	主要创新点	196
8.2	研究展望	197
8.2.1	基础研究	197
8.2.2	应用研究	198
参考文献		199

| 第 1 章 | 绪 论

1.1 流域水沙过程研究背景

流域水沙过程是地球形成以来最重要的自然过程之一，对流域内的水分、植被、生态及人类的生产生活具有重要影响（王光谦，2007）。特别是黄土高原地区，由于其特殊的地形地貌、气候等自然条件，强烈的水土流失造成的泥沙问题成为该地区首要的生态环境问题。与此同时，随着气候变化和人类活动不断增强，流域极值水文事件不断增多，使得该地区原本存在的水土流失、植被退化、水资源短缺、环境污染及耕地面积骤减等问题愈加严重（王飞等，2003）。

在黄土高原地区，特殊的自然地理条件造成的强烈侵蚀作用，使地表沟壑纵横，地貌类型复杂多变。由此形成的复杂的产汇流及侵蚀输沙条件，使得该地区的水沙过程机理非常复杂。同时，由于流域水沙运动存在的条件（如土壤、植被、地形地貌等）具有空间异质性，降水、蒸发等因素在流域上的分布呈现不均匀性与分散性，以及产流产沙过程的非线性运动特性两个方面综合作用，流域水沙过程存在复杂的尺度效应。目前，坡面水沙过程机理认识不完善（张建军，2007）及流域水沙过程尺度效应等问题已经成为流域水沙过程研究的瓶颈。

随着模型技术的不断发展，对流域水沙过程研究的深入，以及生态治理和区域水沙过程管理等实践需求的不断增加，流域水沙过程模型已经从模拟单一过程的经验统计模型、具有部分物理机制的集总式概念模型发展到以基于过程的分布式模型为重点的研究阶段。目前，基于过程的分布式水沙耦合模型已经成为模拟和研究流域水沙过程及尺度问题的重要工具（丁晶和王文圣，2004；金鑫等，2006；王光谦等，2008）。

鉴于上述原因，本书总结了“十一五”国家科技支撑计划课题（2006BAB06 B06）“黄河水资源管理关键技术研究”、国家自然科学基金重点项目（50939006）“‘自然-社会’二元水循环耦合规律研究——以渭河流域为例”、国家自然科学基金青年基金项目（51209222）“黄土区坡面水沙过程空间异质性及其尺度效应研究”、国家自然科学基金面上项目（50709041）“黄土高原水沙过程尺度效应与模拟”、国家自然科学基金面上项目（50779074）“黄土高原流域水文生态过

程相互作用机制与耦合模拟”等项目的研究成果,选择泾河流域及南小河沟流域,在流域水沙过程尺度效应研究、典型水沙过程试验研究的基础上,以 WEP-L 模型为平台建立分布式水沙耦合模型,并以此为工具研究人类活动影响下流域水沙过程响应规律。在深入研究黄土区水沙过程机理及其尺度效应研究、多泥沙地区的水沙过程模拟、流域水土资源评价和管理,以及黄土高原的水土保持和生态建设等方面具有理论研究和科学实践指导意义。

1.2 流域水沙过程研究进展

1.2.1 水文模型研究进展

流域水文模型的发展是随着经济社会发展需要及科学技术水平不断提高而不断向前发展的。20 世纪初至 60 年代,由于世界范围内大规模的水利工程建设,工程水文学逐渐成熟起来。这期间的流域水文模型主要表现为降雨径流响应模型即“黑箱”模型,如 Sherman 的单位线法和 Nash 的瞬时单位线及线性水库法等 (Sherman, 1932; Nash, 1957)。由于这一类型的模型简单实用,不断有学者进行研究发展。随着科学技术的进步,在 20 世纪 60~80 年代,流域水文模型开始出现概念集总式模型即“灰箱”模型。代表性模型包括美国的 Stanford 模型 (Crawford and Linsley, 1966) 和 HEC-1 模型 (HEC, 1968)、日本的 TANK 模型 (Sugawara, 1995)、我国的新安江模型 (Zhao, 1995) 等。这类模型将整个流域作为研究单元,考虑流域蓄满、超渗产流及汇流等概念,并根据河川观测流量来率定模型参数,从而实现对流域产汇流过程的模拟。“灰箱”模型虽然比“黑箱”模型前进了一大步,但尚无法给出水文变量在流域内的分布,满足不了人们对流域水文过程管理,从而实现资源化利用等流域管理的目的。为了实现流域管理实践中对流域各个位置的水位水量等水情信息的需要,Freeze 和 Harlan (1969) 提出了基于水动力学偏微分物理方程的分布式水文模型“蓝本”。自 20 世纪 80 年代以来,计算机技术、地理信息系统和遥感技术取得长足发展,以“蓝本”为主要理念的分布式和半分布式的流域水文模型开始大量涌现。在美国和加拿大常用的包括 HSPF 模型 (Bicknell et al., 1993)、SWMM 模型 (Huber and Dickinson, 1988)、USGS-MMS 模型 (Leavesley et al., 2002) 等。在欧洲有 SHE/MIKESHE 模型 (Abbott et al., 1986)、TOPMODEL 模型 (Beven et al., 1995) 等。在日本也出现了许多有着广泛影响的模型,如小尻模型 (小尻利治等, 1998)、OHyMoS 模型 (高楳琢马等, 1995)、WEP 模型 (Jia et al., 2001) 等。

随着对水文过程机理研究的深入,以及数学、计算机等工具的发展,水文模型在不同方面也取得深入发展。在物理性流域水文模型研究方面可以归结为3个代表性的发展方向(Nash, 1957):在物理性和计算效率之间取得平衡的准物理性水文模型,如SWAT模型等;基于不规则网格的物理性水文模型,如王蕾等(2010)建立的TPModel模型;直接在宏观尺度建立数学物理方程的尺度协调的物理性水文模型,如基于代表性单元流域的水文模拟模型(Tian et al., 2006)等。与此同时,为了解决原有建模思想中存在的问题,许多研究者进行了改进研究,如杨志勇(2007)采用基于空间均化方法建立的宏观尺度水文控制方程描述了计算单元内入渗、壤中流和坡面汇流等基本水文过程,在模拟方程中直接包含了土壤饱和导水率和微地形的空间非均匀性,保持传统“点”尺度方程机理性的同时从理论上避免了方程适用尺度和模型应用尺度的不匹配问题(贾仰文等, 2006a)。同时,为了满足“自然-社会”二元“真实”情景下超大型流域水文模拟的实践需求,WEP(water and energy transfer process)模型(Jia et al., 2006)逐渐形成了满足流域二元水循环模拟的WEP-L模型。在原有WEP模型综合水文和能量过程研究中形成的成熟理论和成果,以数值求解控制水流运动的偏微分方程组为基本手段,在物理性和计算效率之间取得很好平衡的基础上,使得模型在具有深刻的物理机制的同时较好地解决了计算效率问题,并且耦合了天然水循环过程和人工取用水工程,在综合模拟了天然水循环过程的同时也模拟了人工取用水过程,较好地实现了对大中小型流域在自然及全球变化和人类活动扰动条件下的流域水文过程的高精度模拟,从而实现了理论与实践应用的综合发展。

1.2.2 流域泥沙过程研究进展

流域泥沙问题是一个古老而又年轻的科学问题,主要研究土壤侵蚀、水土流失、河道演变、水库淤积、河口海岸变迁,以及由泥沙运动导致的固体物质从山区搬向平原和海洋、形成冲积平原和三角洲及在海洋环境沉积等过程。泥沙过程的微观过程包括土壤颗粒的侵蚀与输移两个方面,土壤颗粒在重力、水力、人类活动等作用下发生移动,并随着流域产汇流过程的进行而发生泥沙的输移。在这个过程中土壤颗粒(或泥沙颗粒)的侵蚀—沉积—输移—再侵蚀是同时发生同步进行的动态平衡过程。

土壤侵蚀指土壤及其他地面构成物质在各种营力作用下,被破坏、剥离、分散、搬运的过程。按侵蚀营力的不同可划分为水力、风力、重力、冻融及复合侵蚀5个类型。其中,水力侵蚀指地表土壤等物质在降水、径流等作用下被冲蚀、

剥蚀、搬运和沉积的过程。复合侵蚀指两种或多种侵蚀营力共同作用的侵蚀类型，如水力、重力作用下发生的泥石流常伴随滑坡侵蚀等。水力侵蚀是土壤侵蚀的重要方式，在全球侵蚀区域中，水力侵蚀危害巨大，是引起水土流失并造成江河湖库泥沙危害的主要来源。黄土高原地区严重的泥沙问题，除了人类活动、气候、地形地貌、植被等原因外，最重要的基础因素是黄土的易蚀性。黄土是第四纪的一种特殊沉积物，是一种疏松细碎的沉积土壤，具有发达的直立性状和湿陷性。这两种特性在降水因素的长期影响和综合作用下，使黄土高原地区从坡面、小流域到大流域等不同尺度上形成了复杂的地形地貌特征。

水力引起的土壤侵蚀是伴随流域内的降水、产流、汇流过程而发生和发展的。水力侵蚀按照侵蚀形态及发生位置可以分为坡面侵蚀和沟道侵蚀两大类。对较小尺度水力侵蚀的研究，又可分为面蚀、沟蚀及潜蚀等。其中，潜蚀也称为洞穴侵蚀，是较为特殊的一种水蚀类型，它是地面径流沿与土体垂直的较大空隙发生潜蚀、冲刷、淘蚀等作用而形成洞穴的过程。这种侵蚀类型经较长时间的发展演化，最终会发展成为较大的沟道侵蚀。而对大中流域，由于无法获得研究区内较为微观的地表信息，一般将水蚀分为坡面和沟道两大类。

1. 坡面土壤侵蚀过程研究进展

坡面侵蚀类型从侵蚀地貌形态上可以分为降雨溅蚀、面（片）蚀和沟道侵蚀。沟道侵蚀又可分为浅沟、切沟、冲沟侵蚀。对细沟侵蚀的归属，到底应归于面蚀还是沟道侵蚀，在过去的研究中曾有过不同的划分，但在目前的研究中基本都趋向将细沟侵蚀归为面（片）蚀。

同时，坡面侵蚀类型从侵蚀的动力学机理上可以分为雨滴溅蚀、薄层水流侵蚀、股流侵蚀及重力侵蚀。下面从侵蚀动力学机理的角度，对黄土区坡面侵蚀研究进展加以综述。

（1）雨滴溅蚀

雨滴溅蚀是发生土壤侵蚀的最开始阶段，主要受降水特征、地形、地面覆被类型、土壤特性、坡面径流及风速、风向等因素的影响。其中，降水特征是影响雨滴溅蚀的动力因子，包括降水量、降雨强度、雨滴级配、雨型、雨滴终速度、降水分布等多种指标。地形、风速、风向及地面覆被类型等因子则通过侵蚀动力因子及溅蚀空间分布对雨滴溅蚀产生影响，包括坡度、坡长、坡向、风速、地表覆被类型与厚度等多种指标。土壤特性则通过其抵抗雨滴侵蚀能力的强弱来影响雨滴溅蚀，包括土壤级配、有机质含量、含水量。

国外研究者对雨滴溅蚀及其影响因素之间的关系进行了研究，Ellison 和 Bisal 采用雨滴大小和终速度，Rose 和 Parket 分别采用降水动能，Forster 和 Meyer 采用

降雨强度对雨滴溅蚀进行了不同角度的研究（吴普特，1997）。Gilley 和 Finkler 利用不同文献中提供的雨滴及终点速度资料，采用统计学方法研究了降水与雨滴溅蚀的关系，并给出了计算方程。Nearing 和 Bradford 利用人工降水装置研究了相同雨滴条件下不同土壤的溅蚀规律，发现相同坡度条件下，雨滴溅蚀与雨滴动能呈线性关系。

国内研究者在雨滴溅蚀方面也进行了深入研究。在雨滴溅蚀的雨滴动能与侵蚀量的规律研究方面：江忠善等（1983）利用滤纸色斑测定雨滴直径的方法，研究了野外降水条件下雨滴大小组成、中数直径和动能与降雨强度的关系，建立了降雨强度与雨滴动能的关系式。范荣生和李占斌（1993）在室内外径流场的人工降雨侵蚀试验中观测及资料分析的基础上，阐述了降雨击溅现象、雨滴溅蚀与径流侵蚀的关系、影响雨滴溅蚀的主要因素，并提出定雨强时溅蚀能力随净雨历时增长而衰减的数学模型。张科利等（1998）通过人工模拟降雨试验，分别观测降雨过程中不同方向上溅蚀强度的变化，根据各影响因子间相互消长及相互制约的关系特点，分析了雨滴溅蚀发生的过程特征及其变化原因。从溅蚀过程的变化特点及溅蚀强度的变化规律比较，定量地探讨了坡度对雨滴溅蚀的影响作用，得出了溅蚀强度与坡度因子之间的关系方程。吴普特和周佩华（1992，1993）、吴普特等（1997）采用人工模拟降雨的试验方法，分别研究了地表坡度对向上坡、侧坡及下坡溅蚀量的影响，给出了雨滴溅蚀总量与降雨动能、降雨强度及地表坡度的复因子关系式。汤立群（1995）对雨滴溅蚀过程及影响因素进行了全面的分析，在揭示黄土地区梁峁上部雨蚀规律的基础上，运用牛顿第二定律，推导出雨滴对土粒撞击力的表达式。此外，王协康和方铎（1997）利用因次分析导出了雨滴溅蚀量的定量表达式，并借助雨滴溅蚀有效径流深对溅蚀公式进行简化和分类，根据试验资料对建立的公式进行率定和研究，利用坡面流分离变量形式，导出了坡面流的微分基本方程及其近似解。

与此同时，对不同下垫面情况下的雨滴溅蚀过程研究也较为深入。下垫面覆被条件对溅蚀的影响，主要表现为植物枝叶截留及其枯落物层对雨滴动能的消减作用，从而减少了地表的降雨溅蚀量。韩冰等（1994）利用天然降雨下 30 年生山杨林内溅蚀试验资料，研究了不同 I_{30} （最大 30 分钟降雨强度）条件下的溅蚀过程。马波等（2010）采取室内模拟降雨手段，利用溅蚀杯法分别测定了不同生长阶段的谷子冠层下及裸地上的溅蚀速率。土壤特性也是重要的影响因素，包括土壤粒径组成、土壤含水量、结构和有机质含量等。在相同的条件下，由于沙土的黏滞力比粉沙壤土小，沙土的雨滴溅蚀强度一般较粉沙壤土大。此外，土壤的结皮特性对雨滴溅蚀也具有重要影响。胡霞等（2005）通过人工模拟降雨溅蚀试验，观察分析结皮的发育特征及与土壤溅蚀的关系发现，降雨过程中有两种类型

结皮形成，即沉积结皮和结构结皮。土壤结皮随着土壤表面大团聚体或者大颗粒的分散而形成，并且伴随着下层大孔隙出现。土表结皮的完善过程，也是土壤抗溅蚀能力增强的过程。

综上所述，对黄土区雨滴溅蚀过程及影响因素，以及其对坡面产沙输沙的研究已经进行了较为深入和全面的研究。

(2) 薄层水流侵蚀

薄层水流侵蚀指坡面薄层水流对土壤的分散和输移过程，是坡面分布最广的土壤侵蚀类型。薄层水流水力学特性及其侵蚀输沙关系研究一直受到人们的普遍重视。目前的研究中描述水流动力学特征的主要水动力学参数包括径流深、径流平均流速、流量、切应力、雷诺数、弗劳德数、过水断面单位能量及阻力系数等。这些参数之间的关系及其与坡面侵蚀产沙过程的关系研究构成了薄层水流侵蚀研究的主要内容。特别是坡面薄层水流在顺坡流动过程中，导致水土界面的土体被剥离破坏，并被水流输移到下游断面，这一过程中径流剥蚀的侵蚀临界条件与泥沙输移过程是研究的重点。

在国外，Horton（1945）于20世纪30年代最早从水文学角度对坡面流的特性进行了系统的定量研究，认为在光滑河床层流水流条件下平均流速与表面水流速度之比为0.67，并在1945年进一步探讨了土壤侵蚀与水流速度和水深的关系。Savat通过试验研究指出了细沟侵蚀与弗劳德数的联系。Foster等（1984）通过不同条件下的试验研究和理论分析探讨了细沟流的流速及分布、水力半径及阻力系数的表达式；Govers根据野外调查和试验研究，建立了细沟流的流量、流速与过水断面面积间的关系；在水流水动力学参数与侵蚀产沙的研究方面，Lyle和Smerdon（1965）首次用水槽试验研究了土壤分离速率与径流剪切应力间的关系；Foster等（1984）提出，当水流剪切应力大于土壤的临界剪切应力时，土壤颗粒被剥蚀，潜在的土壤剥蚀率可表示有效水流剪切力的线性函数。此外，Hudson、Morgan等分别采用径流动能来表示径流侵蚀力（吴普特等，1997）。Elliot和Laflen（1993）将细沟侵蚀分为冲刷、沟头下切、侧蚀和剥蚀四部分，而剥离能力则是各个分量的总和，并认为水流功率能够准确地预测剥离能力。Nearing等（2005）在野外条件下研究了土壤分离过程，指出水流功率更能准确地模拟土壤分离过程。

在黄土高原地区，除从水动力学角度，应用水力学理论研究薄层水流水动力学特性及其与侵蚀产沙的关系之外，同时也从侵蚀地貌的角度，通过模拟面（片）蚀、细沟侵蚀发生发展的地形和水动力学条件研究薄层水流的地形、水动力学临界条件等。

张科利（1998）通过径流冲刷试验研究认为，坡面侵蚀方式由面状侵蚀向细

沟侵蚀发展过程中弗劳德数大于1可作为反映细沟侵蚀发生的水动力临界参数,除满足水动力临界条件外,细沟侵蚀发生还要求具有最小径流量和一定的土壤,临界径流量的大小主要由坡面倾斜度决定。蔡强国(1998)通过雨后野外细沟侵蚀调查资料、试验小区观测和模拟降雨试验研究发现,细沟侵蚀临界坡度与土壤临界抗剪强度呈线性关系。张科利和唐克丽(2000)通过室内径流冲刷试验,研究了黄土坡面细沟侵蚀发生的水动力学机理及其输沙特征,发现试验条件下,黄土临界剪切应力为6.78Pa。丁文峰等(2001)通过玻璃水槽试验和径流冲刷试验研究发现,径流在坡面上并非以均匀流形式运动,而是以滚波的形式运动,并通过建立给定土壤条件下坡面土壤侵蚀率估算模型研究发现,坡面土壤侵蚀的临界径流能耗为7.38J。邵学军等(2004)通过建立陡坡水动力学模型研究了坡面水流细沟侵蚀临界状态的判断方法。认为临界摩阻流速可以作为判别坡面细沟流侵蚀临界状态的水动力学指标,在给定的坡面尺寸、净雨强和初始微地形条件下,计算得出了细沟流摩阻流速达到临界值时所对应的坡度,指出 15° 是一个发生细沟侵蚀的特征坡度。李鹏等(2005)通过室内土槽放水冲刷试验发现,径流输沙率随径流流量的增加而增加,径流输沙率与径流剪切力随坡度呈抛物线形式变化,当坡度在 $21^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 时输沙率最大,且泥沙输移率与径流剪切力之间存在线性关系,径流临界剪切力为 $1.701 \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 时,发生细沟侵蚀的临界径流水深与坡度正弦值成反比。王文龙等(2007)采用多坡段组合模型,通过室内人工模拟降雨试验研究指出,薄层水流侵蚀的临界水动力条件是 $Re \geq 1500$, $E \geq 1.4 \text{ cm}$ 。

除了上述薄层水流侵蚀临界条件研究,对薄层水流的侵蚀能力也进行了较为深入的研究。靳长兴(1995)认为,可以用考虑坡度影响的径流动能来反映径流侵蚀力大小;张科利和唐克丽(2000)根据变坡水槽试验结果,建立了基于水流剪切力的径流剥离能力公式。蔡强国(1995)的野外试验结果表明,径流剥离能力与水流功率呈幂函数关系,同时土壤抗剪强度对径流剥离能力存在影响。李占斌等(2002)根据变坡土槽径流冲刷试验结果,建立了坡面薄层水流剥蚀率与坡面径流通过坡面的能量损耗关系式。

综上所述,国内外学者对薄层水流侵蚀发生的临界条件、侵蚀水动力学过程及产沙输沙过程等方面进行了较为深入的研究。可以为建立物理机制的薄层水流侵蚀模型提供很好的支撑。

(3) 股流侵蚀

股流侵蚀是薄层水流进一步汇流之后的侵蚀形态,其侵蚀和输移能力较薄层水流更强。在国外,由于地形平缓,绝大多数研究者对股流的研究,是以改进的Dubois河道冲刷方程薄层水流侵蚀研究成果为基础进行的,并进一步研究认为,

股流侵蚀与水流有效剪切力之间为指数函数关系,其指数 b 为 1.5。Lafren 等 (1991a, 1991b) 利用牧区径流水沙过程资料率定了基于水流有效剪切力的股流侵蚀方程,并认为股流侵蚀临界剪切力变化范围为 $0 \sim 20\text{Pa}$ 。Zhu (1997) 研究认为,股流侵蚀量是水流剪切力的指数函数,且指数变化在 $1.7 \sim 6.8$ 。

与国外股流侵蚀研究对象显著不同的是,黄土区的股流侵蚀的典型侵蚀地貌包括浅沟和切沟,其下垫面形态更加复杂,地形坡度更大。张科利等 (1991) 采用航片及野外调查的方法,研究了陕北黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀,发现浅沟侵蚀临界坡度约为 18° ,临界坡长为 40m 左右,临界汇水面积约为 650m^2 ,坡度为 26° 左右时最利于浅沟侵蚀的发生。姜永清等 (1999) 利用航空影像研究了周屯沟小流域发现,浅沟分布密度为 7.2 条/ 100m ,平均长度为 64.7m ,平均坡度为 23° 。王文龙等 (2003a) 利用室内降雨+放水试验研究发现,浅沟流量是细沟出现时的 $5 \sim 6$ 倍,流速与水力半径是细沟水流的 $2 \sim 3$ 倍, Re 是细沟的 5 倍左右, Fr 是细沟的 $1 \sim 2$ 倍,阻力系数基本相同,并进一步研究认为,水动力临界条件可以认为是 $Re \geq 7000$, $E \geq 4.8\text{ cm}$ 。龚家国等 (2008) 利用野外放水冲刷试验资料分析认为,坡度对浅沟水流的能量分配具有重要作用,并通过室内模拟降雨试验系统研究了股流侵蚀水流的水动力学参数变化规律。李斌兵等 (2008) 利用高精度全球定位系统 (global positioning system, GPS) 进行纸坊沟小流域的野外调查,发现浅沟侵蚀主要发生在 $15^\circ \sim 35^\circ$ 的坡地上,而切沟主要发生在大于 35° 的坡地上,两者发生的临界地形条件可以表示为上游汇水面积和坡度的函数。秦伟等 (2010) 利用 QuickBird 遥感影像和 5m 分辨率数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 研究发现,陕北浅沟侵蚀的临界坡长介于 $50 \sim 80\text{ m}$ 。

综上所述,由于具体研究对象的差异,国外股流侵蚀研究成果难以直接用于黄土区股流侵蚀过程模拟。国内股流侵蚀地貌的研究为模型模拟股流侵蚀发生条件提供了很好的支撑作用,但股流侵蚀水动力过程研究开展较少,难以支撑股流侵蚀模型的开发研究。

(4) 重力侵蚀

重力侵蚀是黄土区的重要侵蚀形式之一。一般认为重力侵蚀是斜坡上的风化碎屑、土体或岩体在重力作用下发生变形、位移和破坏的一种土壤侵蚀现象。常见的表现形式有泻溜 (debris slip)、崩塌 (land fall) 和滑坡 (landslides) 等。

曾伯庆等 (1991) 通过对晋西三趾马红土的泻溜重力侵蚀观测,发现泻溜类型在一年四季均有发生,高峰出现在 $3 \sim 4$ 月,且其强度旱季大于湿季;并发现红土的泻溜侵蚀发生在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 的陡坡上,其侵蚀模数可达 $48\ 604\ \text{t}/\text{km}^2$,为估算重力侵蚀发生的规模提供参考。曹银真 (1981) 研究认为,重力侵蚀主要位于崩边线以下的区域,并首次运用传统土力学中的滑弧法对谷坡进行简要的受力分

析,得到了土坡不稳定判别关系。付炜(1996)在系统分析黄土丘陵沟壑区土壤重力侵蚀灰色系统预测模型的构造原理和方法的基础上,采用灰色关联度的方法来反映模型的预测值与土壤重力侵蚀观测值之间的关联性,同时引入了残差辨识的理论和方法反映土壤重力侵蚀系统的动态变化规律。该模型对晋西离石王家沟流域的土壤重力侵蚀进行了试验验证,取得了较高的预测精度,为土壤重力侵蚀研究提供了一条定量化分析的新途径。蔡强国等(1996)依据大量小流域野外试验小区观测与模拟降雨试验资料,建立由坡面子模型、沟坡子模型、沟道子模型组成的黄土丘陵沟壑区小流域预测侵蚀产沙量的侵蚀产沙过程模型。在其中的沟坡子模型中,通过拟合得到重力侵蚀量与径流深之间的幂函数关系。该研究为流域水沙过程中的重力侵蚀模拟提供了很好的借鉴。王光谦等(2005)通过运用水力学、土力学等力学理论,建立了黄土区沟坡重力侵蚀的力学概化模型,同时运用模糊及概率分析等数学方法将黄土沟坡的稳定问题转化为失稳概率,以失稳概率作为沟坡崩塌发生的预报条件,从而实现了考虑沟谷水流侧向切割、降雨入渗影响下的重力侵蚀模拟。

与以上针对较大规模重力侵蚀研究不同的是韩鹏等(2002, 2003)利用室内模拟试验的方法对典型坡度条件下黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀规律进行了研究。通过对水沙测量结果的统计分析,同时结合试验中对重力侵蚀现象的观测,给出了试验条件下的临界重力侵蚀含沙量,以此为依据计算了重力侵蚀产沙量及重力侵蚀量达到总侵蚀量50%时对应的“中值时间”。结果表明,在细沟发育过程中,重力侵蚀产沙量存在着由增大到减小再到波动的变化趋势,这一趋势对坡面产沙变化具有重要的影响。重力侵蚀发生的“中值时间”则由小变大,反映了细沟发育的不同阶段重力侵蚀由以沟头坍塌为主向以沟壁坍塌为主的转化过程。该研究说明在黄土区重力侵蚀从较小尺度到较大尺度均是地形塑造和侵蚀产沙的重要类型之一,其研究为黄土区坡面富含沙水流过程机理研究提供了重要的参考。

此外,许多研究者(黄润秋, 2007)利用有限元、数值模拟等方法对滑坡等大型侵蚀过程进行了模拟和研究。由于其计算过程较为复杂,需要的输入参数较多,难以适应流域水沙过程研究的需求。

综上所述,对重力侵蚀过程及其发生的机理研究已经有了一些研究成果,但重力侵蚀在流域水沙过程中对输出流域泥沙的贡献研究,以及重力侵蚀改变流域地貌及其对流域侵蚀产沙的影响研究较少,有待于从其侵蚀发生机理的角度对重力侵蚀过程进行深入研究和重新认识。

2. 河(沟)道泥沙过程研究进展

对多沙河流,河床调整速度慢,影响距离长,必须用非平衡输沙理论描述