

● “十一五”国家重点图书出版规划项目 ●

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

黄土高原沟蚀演变过程 与侵蚀产沙

郑粉莉 肖培青 等/著



科学出版社

www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

黄土高原沟蚀演变过程 与侵蚀产沙

郑粉莉 肖培青 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在全面回顾和总结沟蚀过程与侵蚀产沙研究进展的基础上, 总结归纳沟蚀演变过程的研究方法和分析高精度 GPS 和三维激光扫描 (Li-DAR) 对沟蚀演变动态监测的可行性和精度, 系统研究细沟间侵蚀和细沟侵蚀过程, 定量表征坡面汇水汇沙与细沟侵蚀过程, 全面分析坡面汇水汇沙与浅沟侵蚀过程及其影响因素, 阐明坡面汇水汇沙与片蚀—细沟—一切沟侵蚀方式演变过程, 揭示梁坡与沟坡系统侵蚀产沙过程与动力学机理, 模拟沟蚀形态演变过程。

本书可供从事土壤侵蚀、水土保持、地理学、国土整治、生态环境、环境保护研究的科研人员、高等学校相关专业师生及相关领域管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙/郑粉莉等著. —北京: 科学出版社, 2010

(土壤侵蚀与旱地农业系列专著)

ISBN 978-7-03-026464-0

I. ①黄… II. ①郑… III. ①黄土高原—土壤侵蚀—研究 IV. ①S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 012357 号

责任编辑: 赵 峰 刘希胜/责任校对: 宋玲玲

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 耕者设计工作室

封面照片提供: 田均良

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 17

印数: 1—1 500 字数: 400 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

总 序

资源合理利用与生态环境保护已成为 21 世纪中国西部开发的战略核心。实施这一战略，对粮食和环境安全有着举足轻重的作用。开展土壤侵蚀和旱地农业研究是实施上述战略的关键。土壤侵蚀与旱地农业是黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的两个基本研究方向。该系列专著针对实验室两个研究方向，以黄土高原土壤侵蚀环境调控和提高旱地农业生产力为基础，从土壤侵蚀过程及其调控、土壤侵蚀模型及预测、水土流失、土壤水分养分循环机制及其调控、土壤侵蚀与旱地农业研究的新方法和新技术等领域出发，系统反映实验室基于大量重要研究项目资助获得的研究成果。

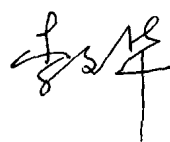
《土壤侵蚀与旱地农业系列专著》具有以下特点：一是长期和集体研究工作的结晶。作者以他们自己的研究工作累积为基础，并综合国内外有关专家、学者的研究成果，较充分反映了我国土壤侵蚀与旱地农业研究取得的成就。二是具有坚实的科学立论基础，作者以严肃、认真的科学态度，从黄土高原实际出发，理论联系实际，观点明确，论据充分，是具有较高权威性的系列专著。三是有很强的应用性，主要基于土壤侵蚀与旱地农业的相关理论，对如何控制水土流失和提升旱地农业生产力提出关键技术措施。

该系列专著各分册相对独立，但又相互补充，体系完整，资料系统，涉及地学和农业科学的诸多领域，是一套在理论上具有一定深度、实践上具有一定广度的丛书。该丛书的出版发行对推动水土保持、优化旱地农业水肥资源管理和提高农业生产力将会产生积极作用。系列专著资料丰富，数据可靠，内容翔实，图文并茂，是理论联

系实践的著作。它不仅可以作为地学、生态学、气象学、土壤学、植物营养学、农学等相关专业科技工作者的参考书，而且可作为高等院校相关专业教学的重要参考书。

我相信这套专著的出版，一定会受到学术界的欢迎，将为推动土壤侵蚀和旱地农业学科建设发挥其应有的作用。

中国工程院院士



2009.10.24

前 言

我国是人口大国与农业大国，也是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一；不仅侵蚀面积大、分布范围广，而且侵蚀强度大、侵蚀危害严重，每年造成的经济损失超过 1000 亿元以上。正如孙鸿烈院士在中国水土流失与生态安全考察时所指出的：“我国严重的水土流失是各种生态问题的集中反映，对粮食安全和生态安全造成严重威胁”。土壤侵蚀已成为我国头号环境问题。

受复杂多变的自然环境和长期人类活动的影响，我国侵蚀类型多样，产沙过程复杂，且不同水蚀类型区沟蚀严重，成为河流泥沙的重要来源。特别在我国黄土高原地区，复杂的地形地貌特征、易蚀的黄土、集中的暴雨、长期和强烈的人类活动，使本区成为我国土壤侵蚀最严重的地区，不但坡面细沟侵蚀、尤其是浅沟侵蚀严重，而且各种沟蚀也异常活跃。在黄土高原丘陵沟壑区，沟蚀产沙量占流域产沙量的 70% 以上；在高原沟壑区，沟蚀量占流域产沙量的 90% 以上。各种形态沟蚀的形成和发展不但导致土地切割破碎，破坏土地资源，而且沟蚀产沙量也成为河流泥沙的重要来源。因此，黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙一直是水利和水土保持界关注的焦点和热点。但由于各种沟蚀发生与演变过程的复杂性及影响因素的多变性，沟蚀过程的研究难度较大，取得的创新性研究成果较少。因此，深入研究我国沟蚀演变过程及其机理，揭示沟蚀产沙过程的动力学机制，分析沟蚀演变过程不同阶段对河流泥沙的贡献，不仅为土壤侵蚀防治提供了重要的科学依据，而且也建立了以侵蚀过程为基础的土壤侵蚀预报模型提供强有力的理论支持。

本书总结集成作者多年来在黄土坡面侵蚀产沙过程与机理的研究结果，特别是基于沟蚀防治和侵蚀模型研发的迫切需要，作者近年来采用野外调查与长期定位观测、模拟降雨试验与模型模拟的研究方法与技术，尤其将高精度 GPS (Trimble 5700) 测量和三维激光扫描 (LiDAR) 技术应用于沟蚀演变过程研究，

在黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙研究方面,取得重要研究进展。

本书较系统、深入地研究各种沟蚀过程,尤其是浅沟侵蚀过程与侵蚀产沙、片蚀—细沟—切沟发育活跃期沟蚀演变过程与侵蚀产沙、坡面汇水汇沙对各种沟蚀过程与产沙的影响、梁坡与沟坡系统侵蚀产沙过程与动力学机理等,这些皆是当前土壤侵蚀研究的重点,也是国际土壤侵蚀研究关注的热点和前沿所在。本书在以下几个方面取得具有一定创新性的研究成果:①利用高精度 GPS 和三维激光扫描仪测量方法动态监测坡面侵蚀形态演变过程,为土壤侵蚀过程动态监测提供新方法与技术;②定量分析浅沟发育初期、中期和后期浅沟侵蚀量对坡面总侵蚀量的贡献及其降雨强度、汇流强度和地形因子等浅沟发育过程的共同影响及其浅沟侵蚀产沙过程与浅沟发育过程的响应关系;③研究坡面侵蚀片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程及其机理;④定量表达梁坡汇水汇沙对沟坡系统侵蚀产沙过程的影响,揭示不同汇水含沙水流下沟蚀演变过程的侵蚀动力机理;⑤系统分析浅沟侵蚀过程对地面地形变化的影响、片蚀—细沟—切沟形态演变过程与坡面形态变化的关系、坡沟系统侵蚀演变过程的地面形态变化。鉴于沟蚀过程的复杂性及其研究难度与实验技术条件限制,尤其是作者认识水平有限,本书的部分研究成果是初步的,有些研究结论尚需进一步探索 and 深化。

全书总共分十章,分别是:第1章,沟蚀过程与侵蚀产沙研究进展;第2章,沟蚀产沙过程的研究方法;第3章细沟侵蚀的发生发展过程与机理;第4章,坡面浅沟侵蚀发育过程与侵蚀产沙;第5章,片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程与侵蚀产沙;第6章,沟蚀演变过程的影响因素;第7章,梁坡-沟坡系统侵蚀产沙过程的定位试验研究;第8章,梁坡-沟坡系统侵蚀产沙过程的模拟试验研究;第9章,沟蚀演变过程的水动力学机理;第10章,侵蚀形态演变过程模拟。书中每一章相对独立地阐述一个中心问题,章与章之间又相互联系,最终形成一个整体——“黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙”。本书写作分工为:第1章由郑粉莉、肖培青、张新和执笔;第2章由郑粉莉、张鹏、肖培青执笔;第3章由郑粉莉、肖培青、汪晓勇执笔;第4章由郑粉莉、武敏、李斌兵执笔;第5章和第6章由郑粉莉、张新和、汪晓勇执笔;第7章由郑粉莉、肖培青、汪晓勇执笔;第8章由肖培青、郑粉莉、汪晓勇执笔;第9章由肖培青、张新和、

郑粉莉执笔；第10章由肖培青、武敏、张新和执笔；最后由郑粉莉汇总定稿，汪晓勇和王彬参加了编辑和校对工作。

本书研究成果主要来自作者主持的科研项目，包括国家重点基础研究发展计划(973)项目课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201)、国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区发育活跃期切沟侵蚀过程研究”(40871137)和重点项目“黄土高原小流域分布式水蚀预报模型研究”(40335050)、中国科学院西部行动计划(二期)项目课题“水文过程响应及其模拟”(KZCX2-XB2-05-03)、中国科学院知识创新工程重要方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422)、“西北农林科技大学创新团队计划”(01140202)和“拔尖人才支持计划”(01140102)、黄河水利委员会项目“黄土丘陵沟壑区小流域分布式产沙机理模型研发”(黄水保200651-09)，黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主方向项目“黄土高原近万年来土壤侵蚀发生演变与趋势预测”(105-Z05)。

作者在土壤侵蚀与水土保持的理论学习和研究过程中，始终得到许多老前辈的指教、领导的支持及同事们的大力帮助。首先感谢中国科学院资源环境科学与技术局、水利部水土保持司、水利部水土保持监测中心、国家自然科学基金委员会地球科学部有关领导的大力支持，感谢西北农林科技大学、水土保持研究所及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室历届领导的热情关怀，感谢安塞水土保持科学试验站的积极支持和大力协助，感谢朱显谟、唐克丽、周佩华、李佩成、王幼民、刘秉正、江忠善、田均良、李靖、李锐、王万忠等老师的热情指教，感谢历届研究生的努力工作和辛勤劳动。

由于作者才识浅薄，书中难免有不妥之处，敬请同仁不吝赐教。

郑粉莉

2009年5月于杨凌

目 录

总序

前言

第 1 章 沟蚀过程与侵蚀产沙研究进展	1
1.1 细沟侵蚀	1
1.2 浅沟侵蚀	4
1.2.1 浅沟侵蚀的概念	4
1.2.2 浅沟侵蚀发生发展过程	5
1.2.3 浅沟水流的水力学特征	5
1.2.4 浅沟侵蚀过程及影响因素分析	6
1.2.5 浅沟侵蚀预报模型	8
1.3 切沟侵蚀	9
1.3.1 切沟发展阶段划分	10
1.3.2 切沟发展的主要方式	10
1.3.3 切沟侵蚀测量技术	10
1.3.4 切沟侵蚀影响因素	11
1.3.5 切沟侵蚀预报模型	11
1.4 沟坡系统侵蚀产沙过程研究进展	12
1.4.1 坡沟系统径流侵蚀形态的垂直分带性研究	12
1.4.2 坡面汇水汇沙的侵蚀产沙作用分析	13
1.4.3 坡沟系统侵蚀产沙的水动力学机理研究	14
1.5 各种沟蚀产沙贡献	15
1.5.1 细沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献	15
1.5.2 浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献	16
1.5.3 切沟侵蚀对流域侵蚀产沙的贡献	16
1.5.4 坡面汇流对坡沟系统侵蚀产沙特征分析	17
1.6 研究存在的问题与亟待研究的科学问题	17
第 2 章 沟蚀产沙过程的研究方法	19
2.1 沟蚀过程研究径流小区法和模拟降雨试验法	19
2.1.1 径流小区法	19

2.1.2	模拟试验法	20
2.2	示踪法研究水蚀过程与小流域泥沙来源	20
2.2.1	几种示踪方法	21
2.2.2	示踪技术在片蚀和细沟侵蚀研究中的应用	22
2.2.3	示踪技术在小流域泥沙来源中的应用	22
2.3	测针法在水蚀过程研究中的应用	23
2.4	高新技术测量方法在沟蚀研究中的应用	24
2.4.1	摄影测量方法研究	24
2.4.2	高精度 GPS 动态监测方法	25
2.4.3	激光扫描动态监测方法	25
2.5	GPS、LiDAR 和测针法监测沟蚀过程的对比	26
2.5.1	试验设计与研究方法	27
2.5.2	三种测量方法	28
2.5.3	数据处理	31
2.5.4	结果与讨论	32
2.5.5	主要结论	37
2.6	小结	37
第 3 章	细沟侵蚀的发生发展过程与机理	39
3.1	试验设计与研究方法	40
3.1.1	细沟发生发展过程研究的试验设计与研究方法	40
3.1.2	坡面汇流对细沟侵蚀发展过程影响的试验设计与研究方法	41
3.2	细沟侵蚀的发生发展	43
3.2.1	细沟侵蚀的形成	43
3.2.2	细沟侵蚀的发育过程	44
3.2.3	细沟的分叉与合并	46
3.2.4	细沟发生的临界条件	47
3.2.5	细沟侵蚀的发展趋势	50
3.3	上方汇水汇沙与坡面细沟侵蚀产沙过程	51
3.3.1	上方汇水汇沙与坡下方细沟侵蚀产沙过程	51
3.3.2	细沟水流水力学参数与细沟侵蚀产沙的关系	55
3.4	小结	62
第 4 章	坡面浅沟侵蚀发育过程与侵蚀产沙	64
4.1	坡面浅沟临界模型	64
4.1.1	研究区域概况与方法	65
4.1.2	结果与讨论	66

4.2 浅沟发育过程的试验研究	67
4.2.1 研究方法	67
4.2.2 浅沟发育过程研究	69
4.2.3 浅沟发育与坡面侵蚀产沙过程	71
4.2.4 浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献	75
4.3 影响浅沟侵蚀产沙过程的因素分析	76
4.3.1 降雨强度对浅沟侵蚀的影响	76
4.3.2 坡上方汇水流量对浅沟侵蚀区侵蚀产沙的影响	77
4.3.3 坡度和坡长对浅沟侵蚀过程的影响	80
4.4 小结	83
第5章 片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程与侵蚀产沙	84
5.1 试验设计与研究方法	85
5.1.1 不同含沙水流条件下侵蚀方式演变研究	85
5.1.2 不同汇水流量条件下坡面侵蚀方式演变研究	85
5.1.3 试验模型及设备	86
5.1.4 试验土槽准备	87
5.1.5 试验过程	88
5.1.6 观测项目及测试方法	89
5.2 沟蚀发生演变过程的模拟试验研究	89
5.2.1 坡面片蚀—细沟侵蚀演变过程	90
5.2.2 坡面细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程	94
5.2.3 连续模拟降雨过程中侵蚀方式演变过程观察	96
5.2.4 坡面侵蚀方式演变对侵蚀产沙过程的影响	97
5.2.5 沟蚀（细沟和切沟）在不同阶段的产沙贡献	102
5.3 不同含沙水流条件下沟蚀演变与侵蚀产沙过程	103
5.3.1 坡面侵蚀—沉积—搬运及上方含沙水流引起的侵蚀产沙量	103
5.3.2 上方汇水汇沙的侵蚀产沙作用	112
5.3.3 上方汇水汇沙对坡面径流含沙量的影响	114
5.4 小结	122
第6章 沟蚀演变过程的影响因素	124
6.1 降雨强度对沟蚀演变过程的影响	124
6.1.1 降雨强度对坡面侵蚀方式演变过程的影响	124
6.1.2 降雨强度对坡面侵蚀产沙过程的影响	128
6.2 坡面汇流对沟蚀演变过程的影响	132
6.2.1 无上方汇水情况下径流量的变化过程	132

6.2.2	上方汇水对坡面径流量的影响	136
6.2.3	上方汇水对坡面径流含沙量的影响	138
6.2.4	上方汇水对坡面侵蚀方式演变及其侵蚀产沙过程的影响	139
6.3	地形因子对沟蚀演变过程的影响	159
6.3.1	坡度对沟蚀演变过程的影响	159
6.3.2	汇水坡长对沟蚀演变过程的影响	163
6.3.3	汇水面积对侵蚀产沙量的影响分析	168
6.4	小结	169
第7章	梁坡-沟坡系统侵蚀产沙过程的定位试验研究	171
7.1	试验设计与研究方法	171
7.1.1	坡面汇水汇沙对不同侵蚀分带侵蚀产沙的影响及其贡献研究	171
7.1.2	梁坡汇水汇沙对沟坡系统侵蚀产沙的影响与贡献	172
7.2	坡沟系统侵蚀产沙的空间分布特征	172
7.2.1	坡面各侵蚀分带侵蚀产沙特征	173
7.2.2	坡面各侵蚀分带侵蚀产沙分配变化规律	173
7.3	坡面汇流对坡面各侵蚀分带侵蚀产沙的贡献	174
7.3.1	坡面汇流对细沟侵蚀带侵蚀产沙的贡献	174
7.3.2	坡面汇流对浅沟侵蚀带侵蚀产沙的贡献	176
7.4	梁坡汇流对沟坡系统侵蚀产沙的影响	179
7.4.1	梁坡汇水汇沙对沟坡侵蚀产沙的贡献	179
7.4.2	梁坡汇水汇沙对沟坡侵蚀产沙影响因子的分析	180
7.5	小结	181
第8章	梁坡-沟坡系统侵蚀产沙过程的模拟试验研究	183
8.1	试验设计与研究方法	183
8.1.1	坡沟系统概化模型制作	183
8.1.2	试验设计	185
8.1.3	试验过程	186
8.1.4	试验观测项目	187
8.2	坡沟系统侵蚀产沙特征	187
8.2.1	坡沟系统侵蚀产沙特征分析	187
8.2.2	坡沟系统的输沙率和含沙量变化过程	188
8.3	坡面汇流与坡沟系统产沙过程	190
8.3.1	坡面汇水汇沙对坡沟系统侵蚀产沙的影响	190
8.3.2	梁坡汇水含沙量与沟坡净侵蚀量的关系	191
8.4	降雨强度对坡沟系统侵蚀产沙的影响	193

8.4.1 降雨强度对坡沟系统径流率变化过程的影响	193
8.4.2 降雨强度对坡沟系统输沙率变化的影响	196
8.4.3 降雨强度对坡沟系统径流含沙量变化的影响	197
8.5 小结	200
第9章 沟蚀演变过程的水动力学机理	201
9.1 沟蚀产沙过程的水动力学基础	201
9.1.1 水力学参数的测算	201
9.1.2 沟蚀产沙过程的水动力学理论基础	203
9.2 坡面侵蚀方式演变过程中水动力学机理分析	204
9.2.1 沟蚀演变过程中坡面径流流速的变化特征	204
9.2.2 侵蚀方式演变过程中水流水力学参数变化特征	212
9.2.3 沟蚀演变过程中的水动力学参数与输沙率的关系	217
9.3 梁-沟系统侵蚀产沙过程中的动力学机理分析	221
9.3.1 坡沟系统坡面径流流速变化特征	221
9.3.2 坡沟系统坡面径流流态特征	224
9.3.3 坡沟系统径流侵蚀的水动力学特征	228
9.4 小结	233
第10章 侵蚀形态演变过程模拟	234
10.1 研究方法	234
10.1.1 利用地形测针仪进行沟蚀测量的研究方法	234
10.1.2 地面侵蚀形态数据处理与数字高程模型 (DEM) 的制作	235
10.2 浅沟侵蚀演变过程的地面形态模拟	236
10.3 片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程的地面形态模拟	238
10.3.1 沟蚀侵蚀产沙形态演变过程	238
10.3.2 数字高程模型的比较及沟蚀量的计算	241
10.4 坡沟系统侵蚀演变过程的地面形态模拟	244
10.4.1 不同降雨强度下坡面侵蚀形态的空间分布	244
10.4.2 不同降雨强度下坡面侵蚀形态的模拟	245
10.5 小结	247
参考文献	248

第 1 章 沟蚀过程与侵蚀产沙研究进展

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的重要环境问题之一，在我国表现尤为突出。我国水蚀面积达 179 万 km^2 ，每年流失掉的土壤达 50 亿 t。土壤侵蚀不但导致土地质量退化，而且被侵蚀掉的物质随径流汇集到河网系统中，不仅抬高河床，淤塞水利工程，加剧洪水灾害；同时，径流挟带的大量侵蚀物质还会污染水源，引起一系列其他环境问题，严重影响资源环境与社会经济可持续发展。因此，土壤侵蚀研究受到世界各国的普遍重视。19 世纪 70 年代德国科学家 Wollny 建立了世界上第一批径流小区，研究土壤、地面覆盖、坡度等与土壤侵蚀的关系。此后，美国科学家 Miller 建立了研究作物类型及其轮作对土壤侵蚀影响的试验小区。但到 20 世纪 40 年代以前，研究工作主要是对侵蚀现象的观察和一般性描述。自 40 年代，Ellison (1944, 1947a, 1947b) 将水蚀过程分为 4 个子过程，即雨滴侵蚀过程、径流侵蚀过程、雨滴搬运过程和径流搬运过程，标志着土壤侵蚀研究已经发展到对侵蚀过程及其机理进行研究的阶段。60 年代后，由于相关学科的发展、测验方法的改进以及计算机的应用，土壤侵蚀过程及其机理的研究逐步深入，为建立具有一定物理成因基础的侵蚀产沙过程数学模型奠定了基础。80 年代后，侵蚀产沙过程及其机理研究和侵蚀预报模型的研究得到快速发展。

1.1 细沟侵蚀

细沟是在坡面径流差异性侵蚀条件下，在坡面上产生的一种小沟槽地形，其纵剖面与所在斜坡纵剖面一致，并能为当年犁耕所平复。细沟侵蚀是细沟小股流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程。细沟侵蚀的发生取决于坡面水流的水力学特性和坡面土壤条件。

Meyer 等 (1975) 认为存在着发生细沟侵蚀的临界流量，并以细沟内流量 (Q_r) 与细沟发生的临界流量 (Q_c) 的差值作为变量，建立了计算细沟冲刷量 (E_r) 模型，即

$$E_r = K_r(Q_r - Q_c) \quad (1-1)$$

式中， K_r 为细沟土壤可蚀性。

发生细沟侵蚀的临界流量与降雨特征和地面坡度等有关。试验观测资料表明，细沟发生的临界流量随着坡度和降雨能量的增加而减小 (郑粉莉等, 1987)。Savat

和 De Ploey (1982) 等认为径流水动力的增加是细沟发生的主要原因, 当坡面径流的弗汝德数为 2~3 时, 细沟发育的概率很大。Rauws 和 Govers (1988) 研究发现, 细沟侵蚀发生的临界条件可用有效剪切流速与土壤饱和黏滞力之间的线性关系来表述, 且试验结果表明, 3~5cm/s 的切应流速是细沟发生的水力学临界。陆兆熊和 Merz (1992) 在加拿大和黄土高原所进行的试验结果表明, 坡面上细沟发生的临界切应流速为 7~8cm/s。蔡强国 (1998b) 的试验结果表明, 细沟开始下切的临界水流动力 (E_{ws}) 与前期表土抗剪强度 (K_r) 呈线性关系。张科利 (1998) 认为弗汝德数 $F_r \geq 1$ 是细沟发生的水动力临界, 且物理意义明确。

许多学者研究了细沟水流的水力学要素之间的关系。Foster 等 (1984a, 1984b) 依据田间形成的实际细沟, 在实验室制作了相同的模型 (0.91m × 4.27m), 观测细沟水流流速对沟壁扩展与下切的影响, 研究细沟侵蚀的水力学, 在坡度为 9% 试验条件下, 细沟断面标准差随着雷诺数的增大而降低, 并给出了下列回归方程:

$$V = 16.0Q^{0.28}S^{0.48} \quad \text{或} \quad V = 121R^{0.73}S^{0.48} \quad (1-2)$$

$$R = 0.44A^{0.53} \quad (1-3)$$

式中, V 为平均流速; Q 为流量; S 为坡降; R 为水力半径; A 为过水断面。

Gilley 等 (1990) 和 Gioves (1992) 研究了缓坡地细沟水流水力学特性, 给出了细沟几何形态要素、流速、流量等之间的关系式。张科利 (1998) 通过人工放水试验, 得出下列关系式:

$$B = 0.39Q^{0.26}J^{-0.026} \quad (1-4)$$

$$h = 0.68Q^{0.48}J^{-0.17} \quad (1-5)$$

$$U = 2.12Q^{0.26}J^{0.25} \quad (1-6)$$

式中, B 为过水断面宽度; h 为平均水深; U 为平均流速; Q 为流量; J 为坡降。

van Liew 和 Santon (1983) 利用量测的径流深度和细沟几何形状所获得的资料, 得出了表示细沟湿周 (W_r) 与过水断面面积 (A_r) 的幂函数关系, 即

$$W_r = 3.22A_r^{0.45} \text{ (没有残茬覆盖)} \quad (1-7)$$

$$W_r = 6.88A_r^{0.37} \text{ (中度残茬覆盖)} \quad (1-8)$$

$$W_r = 9.82A_r^{0.33} \text{ (高度残茬覆盖)} \quad (1-9)$$

关于细沟的发育过程, Mervitl (1984) 依据室内试验资料将细沟形成过程分为片流、线性水流形成、隐细沟和细沟 4 个发育阶段。日本学者^①对坡面上的细沟发育理论进行了较深入的研究, 指出细沟在坡面上的交汇概率与细沟总数成

① 日本地理学会访华团学术报告·论坡面上的细沟网·陈永宗译·水土保持译丛, 1980, (1)

正比, 细沟分叉概率与细沟相对宽度 (宽/深) 成正比, 并给出了估算细沟发育数量的方程式。郑粉莉等 (1987) 分析了不同坡型和浅沟集水区坡面的细沟分叉与合并, 认为细沟分叉与合并主要受坡面微地形、土壤抗侵蚀性能、根系固结作用的差异以及径流侵蚀力空间分异的影响。

细沟水流的冲刷作用是几种作用的综合, 包括溯源冲刷、水流剪切力作用和因水流冲刷而引起的坍塌。基于这一概念, Meyer 等 (1975) 将细沟冲刷模型表示为

$$E_w = A_s + A_m \quad (1-10)$$

式中, E_w 为细沟冲刷; A_s 为剪切冲刷; A_m 为溯源冲刷。

Elliot 和 Laflen 更进一步把水流的分散能力分为水流冲刷、沟头冲刷、水流淘刷坍塌和细沟沟壁崩塌 4 个部分。

考虑到土壤的可蚀性和存在临界切应力, Foster (1982) 提出的细沟冲刷模型为

$$E_r = K_r(\tau_e - \tau_{cr})C_r \quad (1-11)$$

式中, E_r 为单位面积土壤流失量; τ_e 为水流作用于土壤表面的有效切应力; τ_{cr} 为临界切应力; K_r 为细沟土壤可蚀性; C_r 为土壤管理因子。

Nearing 等 (1989) 认为细沟水流的冲刷力可用水流的切应力大于土壤临界切应力以及输沙能力大于实际输沙量的概念来确定, 提出如下模型, 此模型即为美国新一代水蚀预报模型 (WEPP) 的物理基础。

$$D_i = D_c[1 - G/T_c] \quad (1-12)$$

$$D_c = K_r(\tau_i - \tau_c) \quad (1-13)$$

式中, D_i 为细沟冲刷率; D_c 为水流分散能力; T_c 为水流输沙能力; G 为实际输沙量; K_r 为细沟土壤可蚀性; τ_i 为水流切应力; τ_c 为土壤临界切应力。

同一土壤条件对片蚀和细沟侵蚀的影响是不同的。Meyer 和 Foster 等提出了细沟土壤可蚀性的概念, 在修正通用土壤流失方程 (RUSLE)、水蚀预报模型中都将细沟间土壤可蚀性 (K_i) 与细沟土壤可蚀性 (K_r) 加以区别。

有关细沟侵蚀影响因素 (降雨径流、土壤、坡度、坡长、坡形、土壤管理等) 以及各因素之间的关系的研究取得了丰硕成果, 对于促进细沟侵蚀过程及侵蚀预报起了重要作用。Young 和 Onstad (1982) 认为有机质含量、团粒结构、土壤密度、分散率对细沟侵蚀产生重要影响, 壤质沙土细沟侵蚀最强烈。陈永宗^①认为, 由于受犁底层土壤抗侵蚀性较强的影响, 细沟发育速度缓慢。郑粉莉等 (1989) 研究了土壤水稳性团粒结构、有机质含量、容重和前期土壤含水量对

① 陈永宗. 1963. 陕北绥德地区沟间地水流侵蚀形态形成和分布规律的初步研究

细沟侵蚀的影响,认为土壤水稳性团粒结构与细沟侵蚀关系较密切,而土壤有机质含量与水稳性团粒结构的关系最密切,建立了细沟侵蚀量(G_r)与径流位能(E_g)、降雨动能(E_d)的关系式: $G_r=6.49 \times 10^{-9} E_g^{1.692} E_d^{1.330}$ 。van Liew 和 Santon (1983)的研究结果表明,细沟侵蚀量与坡度的 0.67 次方成正比;以前的研究认为(陈永宗,1976),细沟发生的临界坡长与坡度呈线性正比关系,但更进一步的研究表明,在不同侵蚀性降雨条件下,细沟发生的临界坡长与坡度皆成具有最小值的二次抛物线关系(郑粉莉,1989a)。

1.2 浅沟侵蚀

浅沟侵蚀是坡面土壤侵蚀过程中的一种重要类型,是坡耕地上发展的沟状集流侵蚀过程。国际上将浅沟侵蚀称为临时切沟侵蚀(ephemeral gully erosion),对浅沟侵蚀的研究则始于 20 世纪 80 年代。我国对浅沟侵蚀的研究是从土壤侵蚀分类和坡面土壤侵蚀垂直带划分开始的,浅沟侵蚀的定量研究与国际同步,即始于 20 世纪 80 年代。目前研究仍局限在浅沟侵蚀量、浅沟发生的临界坡长与坡度及其影响因素、集水面积、浅沟横断面形态等方面。

1.2.1 浅沟侵蚀的概念

浅沟侵蚀是细沟侵蚀向切沟侵蚀演化的一种过渡侵蚀类型。朱显谟(1956)在土壤侵蚀分类中将现代沟蚀分为细沟侵蚀、浅沟侵蚀和切沟侵蚀,认为浅沟由细沟演变而来,能发展为切沟,浅沟是沟蚀的过渡形态,能横向耕作,但不能消灭它的痕迹。刘元保等(1988b)从侵蚀沟的演化系列考虑,强调浅沟是指暴雨径流冲刷槽形成后,在其底部所形成的侵蚀沟槽。唐克丽等(1998)指出,浅沟由坡耕地上主细沟发展形成,其横断面因不断的再侵蚀和再耕作呈弧形扩展,无明显的沟缘,在黄土丘陵区,浅沟的深度均大于耕层厚度,一般为 20~30cm,也有超过 50cm 的,在南方花岗岩风化壳丘陵斜坡上,也可见到浅沟,其宽度约 1m,深度可超过 0.5m。

20 世纪 80 年代以来提出一种新的侵蚀类型——临时切沟侵蚀,自此将沟蚀分为细沟侵蚀、临时切沟侵蚀和切沟侵蚀,认为临时切沟每次侵蚀的宽度和深度大于细沟,但小于固定切沟,不妨碍耕作,但不能消除其痕迹。随着年复一年耕作与侵蚀的交替,临时切沟侵蚀可发展为固定切沟侵蚀。由此可见,国外的临时切沟与我国的浅沟指的是同一种侵蚀类型(图 1-1)。