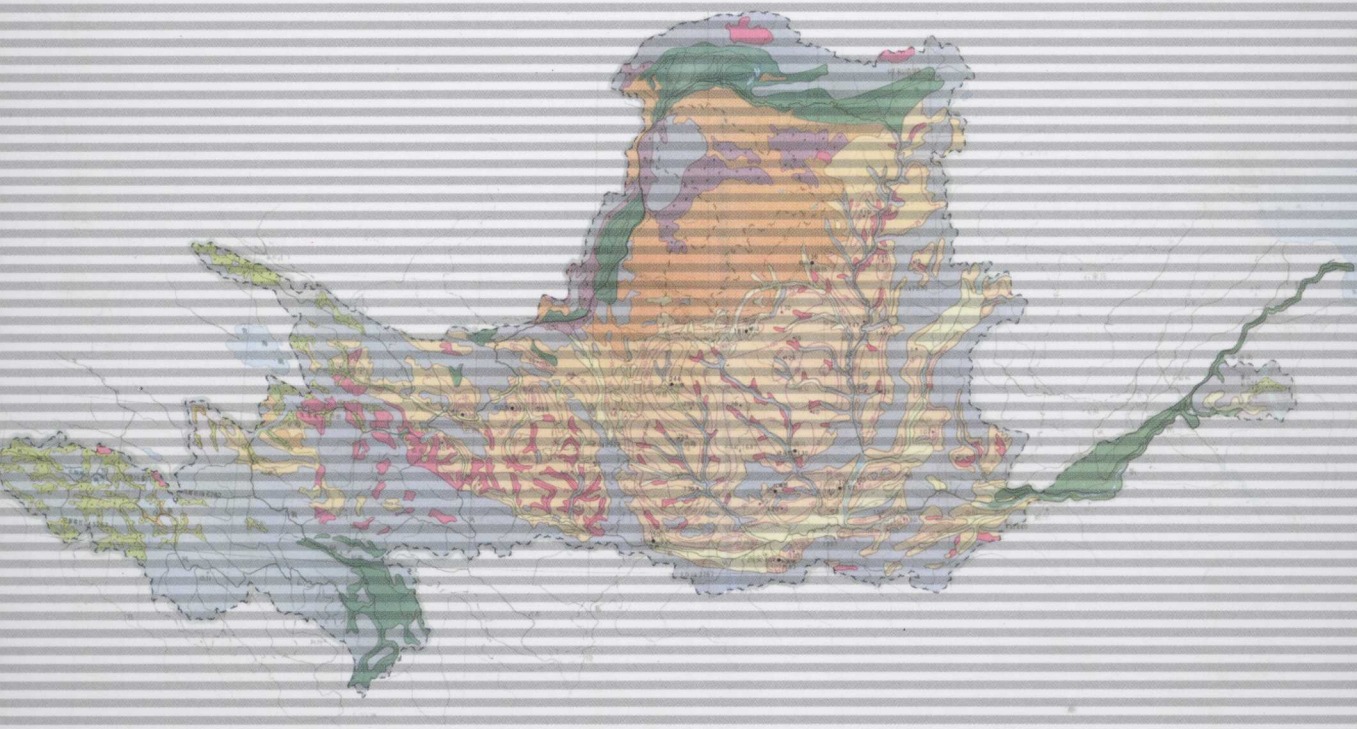


**Erosion Dynamics of
Watershed**

流域侵蚀动力学



余新晓 秦富仓 等/著



科学出版社
www.sciencep.com

流域侵蚀动力学

余新晓 秦富仓 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以位于黄土丘陵沟壑区的甘肃省天水市典型流域为对象,分析黄土地区流域内降水量的空间相关性和变异性,采用不同降水空间插值方法,研究受小流域地形影响的降水空间分布规律;采用景观生态学的理论和方法及地理信息系统技术和手段,研究流域的森林植被/土地覆盖空间异质性变化特征与土壤侵蚀的相互关系;分析流域径流与侵蚀产沙形成机制,研究流域土地利用/森林植被格局影响下的径流、洪水、侵蚀产沙的变化规律,辨析流域土地利用/森林植被格局与洪水径流、侵蚀产沙的耦合关系;利用基于GIS软件的水文模型SWAT和土壤侵蚀预报模型GeoWEPP,模拟不同流域土地利用格局下的径流和侵蚀产沙过程,进而初步建立了流域侵蚀动力学过程的基本理论。

本书可供从事水土保持学、地理学、环境科学、泥沙运动力学等专业的研究、管理人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域侵蚀动力学/余新晓等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019378-0

I. 流… II. 余… III. 流域-土壤侵蚀-研究 IV. S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第105314号

责任编辑:赵 峰 罗 吉/责任校对:赵桂芬

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>

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

*

2007年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年7月第一次印刷 印张:20 1/4

印数:1—1 500 字数:455 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《流域侵蚀动力学》

著作者名单

余新晓	秦富仓	李建牢	张满良
陈丽华	牛健植	张志强	谢宝元
陈东立	谢媛媛	张晓明	

序

土壤侵蚀是制约人类社会发展的一个非常突出的环境问题。由于严重的土壤侵蚀，致使土地生产力与土壤肥力降低，土壤蓄水能力减弱，生态环境陷入恶性循环状态。开展土壤侵蚀机理研究，特别是植被影响下的土壤侵蚀动力机制研究，对于防治土壤侵蚀，改善生态环境具有十分重要的科学价值。

自 19 世纪末德国科学家第一次开展坡面侵蚀试验以来，国际上逐步开始了土壤侵蚀定量化研究，期间开展了以径流小区试验、室内和室外人工模拟降雨试验为主的坡面土壤侵蚀研究工作，在土壤侵蚀过程、流域产沙与输沙过程、土壤侵蚀预测预报、土壤侵蚀与环境的关系等方面取得了丰富成果。纵观土壤侵蚀研究发展史，过去所做的研究多数集中于针对坡面和小区的试验统计分析、定性描述和线性模拟，以流域为单元，研究流域各种侵蚀营力的能量转换和地表物质在内外营力作用下的分散、剥蚀和输移过程，以及流域土地利用、植被变化对流域侵蚀产沙过程的作用机制方面的研究还不多。

本书是余新晓教授等在国家重点基础研究发展计划项目（973 项目）“森林植被对土壤侵蚀过程的调控机理”研究基础上编著而成的。该书立足于国际土壤侵蚀学科的前沿，以长期和大量的实测数据为基础，基于 3S 技术，系统地研究了流域降雨、径流侵蚀力变化规律与地表物质在流域中的转移过程及其在流域土地利用与森林植被格局变化的响应机制。先读此书，甚感欣慰，受益颇多，相信该书对于丰富土壤侵蚀动力学，推动土壤侵蚀理论研究将起到积极作用，期望能早日付梓出版。

中国工程院院士

2007 年 3 月 18 日

前言

土壤侵蚀是地球表面普遍存在的一种十分复杂的自然现象，也是造成环境退化的一个主要因素。长期以来，由于人类不合理地利用自然资源，导致植被生存环境受到极大地破坏，引发了严重的土壤侵蚀。侵蚀产沙是一个复杂的物理过程，也是一个复杂的系统，它受到许多自然因素的制约，各个因素之间又存在着错综复杂的相互作用。深入研究侵蚀产沙的物理过程，科学分析流域水沙变化规律，对于防治土壤侵蚀与改善生态环境具有十分重要的科学价值。

土壤侵蚀动力学研究始于 20 世纪 30 年代，期间开展了以径流小区试验、人工模拟降雨试验为主的研究工作，在土壤侵蚀过程、流域产沙与输沙过程、土壤侵蚀预测与预报、土壤侵蚀与环境的关系等方面取得了丰富成果。过去的土壤侵蚀动力学研究多数注重于针对坡面和小区的试验统计分析、定性描述和线性模拟，以流域为单元，研究流域各种侵蚀营力的能量转移和地表物质在内外营力作用下的分散、剥蚀和输移过程，以及流域土地利用、植被变化对流域侵蚀产沙过程的作用机制方面的研究还不多。本书立足于国际土壤侵蚀学科前沿，以长期和大量的实测数据为基础，从力学、能量转移的概念出发，基于 3S 技术，在流域景观格局研究的基础上，系统地研究了流域降雨、径流侵蚀力变化规律与地表物质在流域中的转移过程及其在流域土地利用与森林植被格局变化的响应机制。这一研究内容对于丰富土壤侵蚀动力学研究、推动土壤侵蚀学科的发展具有重大意义。

本书是在国家重点基础研究发展计划项目（973 项目）“森林植被对土壤侵蚀过程的调控机理”研究基础上整理而成的。全书针对黄土丘陵沟壑区的农林复合景观特点，以甘肃省天水市的吕二沟、罗玉沟、桥子东沟、桥子西沟为对象，以景观生态学、地统计学、土壤侵蚀动力学等理论为依据，基于 3S 技术建立流域空间数据库和属性数据库，进行不同时期流域土地利用/森林植被格局变化动态分析；利用研究流域多年降水资料，研究流域降水的时空变化规律及流域土地利用/森林植被格局影响下的径流、侵蚀产沙变化规律，建立了流域森林植被格局与洪水径流和侵蚀产沙的耦合关系；在地理信息系统支持下，建立了流域景观森林植被与土壤侵蚀评价的综合指数；基于流域水文预报模型 SWAT 和土壤侵蚀预报模型 GeoWEPP，在对模型参数进行选择、率定的基础上分析不同森林植被格局情景下的流域侵蚀产沙变化规律，探讨适合研究流域所在地区的最佳流域森林植被格局。

全书共分 10 章。第 1 章主要阐述了流域侵蚀动力学的基本概念、研究进展及研究区概况与研究方法；第 2 章分析了流域水系的拓扑学特征、形状特征和结构特征，基于 GIS 建立了研究流域的数字高程模型，为研究流域森林植被格局与侵蚀产沙关系奠定基础；第 3 章在流域基本数据库建设的基础上，利用景观分析软件 FRAGSTATS，选择适于研究流域和研究目标的景观格局指标，分析流域不同时期森林植被格局变化规律，

进行不同时期流域土地利用/森林植被格局变化动态分析,重点分析流域森林植被格局的动态变化规律;第4章利用研究流域多年降水资料,分析流域降水的时空变化规律,采用不同降水空间插值方法,研究受小地形影响的流域降水空间分布规律;第5章结合研究流域特点研究流域产、汇流的机理;第6章研究降雨、坡面径流和沟道径流侵蚀机理,进而分析流域植被对侵蚀的影响机制;第7章以研究流域多年降水、洪水和侵蚀产沙资料为基础,探讨了流域土地利用/森林植被格局对径流和侵蚀产沙过程的影响机制,进一步探讨流域土地利用/森林植被格局与洪水径流及侵蚀产沙的耦合关系;第8章在地理信息系统支持下,建立了流域景观森林植被与土壤侵蚀评价的综合指数——流域景观自然度(LND)、流域景观土壤侵蚀指数(SEI)和流域景观评价耦合指数(CI),在此基础上,模拟了四种流域森林植被/土地利用格局状况下流域的土壤侵蚀变化特征;第9章基于水文分析模型SWAT,应用GIS的空间分析功能,分析了罗玉沟流域在典型年份不同时段径流、泥沙和养分流失的空间分布特征以及不同土地利用类型的对水文响应的影响;第10章利用美国农业部(USDA)土壤侵蚀预报模型GeoWEPP,在对模型参数进行选择、率定的基础上,对研究流域实测数据进行验证,进而分析不同森林植被格局情景下的流域侵蚀产沙变化规律,探讨适合研究流域所在地区的最佳流域森林植被格局。

流域侵蚀动力学是土壤侵蚀学的一个重要领域,有很多问题尚处于探索之中,随着研究的不断深入,必将对土壤侵蚀理论体系的发展起到积极的推动作用。作者殷切希望本书的出版能够引起有关人士对该领域的更大关注和支持,并希望对于从事土壤侵蚀动力学研究的学者有所裨益,共同将这一领域推向新的发展阶段。

在本书写作过程中,课题组成员通力合作,进行了大量的资料整理和分析工作。特别要感谢的是黄河水利委员会天水水土保持实验站,他们为该项研究的顺利进行提供了很大的帮助。感谢中国工程院院士关君蔚先生欣然为本书作序。考虑到全书的系统性,书中参阅了大量参考文献,借此机会作者向这些文献的作者表示衷心的感谢!科学出版社为本书的出版给予了大力支持,编辑人员为此付出了辛勤的劳动。在此表示诚挚的感谢!

余新晓

2007年3月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流域与土壤侵蚀	1
1.1.1 流域的相关概念	1
1.1.2 土壤侵蚀	1
1.2 流域侵蚀动力学过程	3
1.2.1 流域侵蚀动力学的相关概念	3
1.2.2 流域侵蚀动力学的研究内容	4
1.3 流域侵蚀动力学研究进展	6
1.3.1 土壤侵蚀动力学研究	6
1.3.2 流域植被变化与侵蚀关系研究	8
1.3.3 流域土壤侵蚀模型研究	15
1.3.4 今后的发展趋势	19
1.4 研究区概况	20
1.4.1 研究区域自然环境概况	20
1.4.2 研究流域基本情况	23
1.5 研究方法	33
1.5.1 研究技术路线与方法	33
1.5.2 基础数据的收集与整理	36
第 2 章 流域特征与流域数字高程模型	41
2.1 流域水系拓扑学特征	41
2.1.1 水系分叉	41
2.1.2 河流分级	41
2.1.3 河数定律	43
2.2 流域的形状特征	43
2.2.1 流域面积	43
2.2.2 面积定律	44
2.2.3 流域长度和宽度	44
2.2.4 流域形状	44
2.3 流域的结构特征	45
2.3.1 河网密度和河道维持常数	45
2.3.2 河流频度和链频度	45

2.3.3	面积-河长曲线	46
2.3.4	高程曲线	46
2.3.5	流域坡度	46
2.4	流域数字高程模型	47
2.4.1	基于 GIS 的流域空间属性数据库建立	47
2.4.2	基于 DEM 的流域汇流网络建立	48
第 3 章	流域景观格局演变	54
3.1	流域景观空间格局分析	54
3.1.1	景观格局研究方法	54
3.1.2	资料获取及数据处理方法	55
3.1.3	景观单元特征指数提取	56
3.1.4	主要景观特征指数的生态意义	57
3.2	流域森林植被/土地利用结构及动态变化分析	62
3.2.1	罗玉沟流域土地利用结构动态分析	62
3.2.2	吕二沟流域土地利用结构动态分析	64
3.2.3	桥子东沟、桥子西沟流域土地利用结构动态分析	66
3.3	流域景观动态变化	67
3.3.1	罗玉沟流域森林植被景观格局动态分析	71
3.3.2	吕二沟流域森林植被景观格局动态分析	75
3.3.3	桥子东沟、桥子西沟流域森林植被景观格局动态分析	79
第 4 章	流域降雨时空分布规律	84
4.1	降水的基本要素	84
4.1.1	降水及其要素	84
4.1.2	降水的形成与分类	85
4.1.3	影响降水的因素	86
4.2	流域降水量的时间分布	87
4.2.1	流域降水年际分布规律	88
4.2.2	降水量的年内分布规律	90
4.3	流域降水的空间分布	90
4.3.1	流域内降水量与地面高程的关系	91
4.3.2	流域降雨的空间不均匀性分析	91
4.3.3	雨量站间降水相关性分析	93
4.4	流域降水量的空间插值	94
4.4.1	流域降水量空间内插方法选择	94
4.4.2	数据内插方法在流域降雨量空间分布中的应用	100
第 5 章	流域产汇流过程	106
5.1	产流机制	106
5.1.1	植物截留	106
5.1.2	填洼	113

5.1.3	包气带结构及其对降雨的再分配	114
5.1.4	流域产流的物理机制	116
5.2	流域产流过程	119
5.3	流域汇流	120
5.3.1	流域汇流过程	120
5.3.2	流域汇流时间	121
第6章	水力侵蚀与产沙过程	122
6.1	降雨的力学特征与侵蚀机理	122
6.1.1	降雨的力学特性	122
6.1.2	植被对降雨侵蚀力的影响	124
6.2	坡面径流侵蚀过程机制	126
6.2.1	坡面产流过程	126
6.2.2	坡面流水力特性	127
6.2.3	坡面流侵蚀产沙力学过程	128
6.2.4	植被对坡面径流侵蚀的影响	130
6.3	沟道侵蚀机制	136
6.3.1	沟蚀类型	136
6.3.2	沟道侵蚀机理	137
6.3.3	沟道侵蚀过程	140
第7章	流域土地利用/森林植被格局变化的产流产沙响应	143
7.1	流域森林植被格局变化与径流关系	143
7.1.1	流域森林植被格局对年径流量的影响	143
7.1.2	流域森林植被格局对单次降雨径流量的影响	158
7.1.3	流域森林植被格局对洪水过程影响	161
7.2	流域森林植被格局与洪水径流耦合关系	166
7.3	流域森林植被格局与侵蚀产沙的关系	168
7.3.1	流域森林植被格局影响下的侵蚀产沙年际变化	168
7.3.2	流域森林植被格局影响下的侵蚀产沙年内变化	171
7.3.3	流域森林植被格局与次降雨侵蚀产沙的关系	181
7.4	流域森林植被格局与侵蚀产沙耦合关系	192
第8章	流域土地利用/植被与土壤侵蚀景观格局耦合	195
8.1	流域森林植被与土壤侵蚀景观格局耦合指标的建立	195
8.1.1	流域森林植被景观自然度的评价	195
8.1.2	流域景观土壤侵蚀指数的制定	199
8.2	流域森林植被与土壤侵蚀景观格局耦合关系	211
8.2.1	流域景观格局评价的耦合指数	211
8.2.2	流域景观格局评价耦合指数分析	213
8.3	流域森林植被情景模拟及优化格局分析	213
8.3.1	建立特定情境	214

8.3.2 特定情境分析	214
8.3.3 优化格局分析	221
第9章 流域土地利用/森林植被变化的水文生态响应	223
9.1 SWAT模型及其参数检验	223
9.1.1 SWAT模型介绍	223
9.1.2 SWAT模型结构	223
9.1.3 模型参数敏感度分析	226
9.1.4 模型参数的校准	229
9.2 基于SWAT模型的流域水文生态响应模拟与分析	232
9.2.1 1986年流域水文生态响应模拟分析	233
9.2.2 1995年水文响应模拟	235
9.2.3 2000年水文响应模拟	238
9.2.4 三期模拟结果的对比分析	241
9.3 基于SWAT模型的流域水文生态响应预测	243
9.3.1 不同降水条件下的水文模拟	243
9.3.2 不同森林植被覆盖下的水文模拟	245
9.3.3 耕地水土保持措施下的水文模拟	247
第10章 流域侵蚀产沙过程模拟	250
10.1 WEPP模型简介	250
10.1.1 WEPP模型结构	251
10.1.2 WEPP模型的功能模块	251
10.1.3 WEPP模型的基本原理	253
10.1.4 GeoWEPP模型结构	257
10.2 GeoWEPP数据输入及参数确定	258
10.2.1 地理信息数据的输入	258
10.2.2 气候参数	260
10.2.3 土壤参数	260
10.2.4 植被参数	261
10.2.5 WEPP模型参数率定方法	264
10.2.6 参数在坡面侵蚀模拟中的验证	265
10.3 WEPP模型对坡面侵蚀产沙过程模拟	266
10.3.1 不同植被条件下坡面多年平均侵蚀产沙分析	266
10.3.2 不同降水水平年坡面侵蚀产沙变化	268
10.3.3 单次降水条件下坡面侵蚀产沙变化	274
10.4 GeoWEPP对流域侵蚀产沙模拟	276
10.4.1 吕二沟流域侵蚀产沙过程模拟	278
10.4.2 罗玉沟流域侵蚀产沙模拟	279
10.5 不同水文条件下流域森林植被变化对侵蚀产沙影响	282
10.5.1 平水年流域侵蚀产沙变化	282

10.5.2 干旱年份流域侵蚀产沙变化 285

10.5.3 丰水年份流域侵蚀产沙 288

10.5.4 不同降水水平年侵蚀产沙模拟结果对比 291

10.6 流域侵蚀产沙与森林植被协同变化规律 293

10.6.1 流域森林植被情景的建立 293

10.6.2 流域森林植被变化对径流的影响分析..... 294

10.6.3 流域森林植被格局变化的侵蚀产沙响应 295

10.6.4 林分不同生长阶段流域侵蚀产沙过程..... 298

参考文献 301

第1章 绪 论

1.1 流域与土壤侵蚀

1.1.1 流域的相关概念

流域是指地面分水线包围的区域。流域有闭合流域和非闭合流域之分。地面分水线与地下分水线重合的流域称为闭合流域；地面分水线与地下分水线不重合的流域称为非闭合流域。闭合流域与周围区域不存在水流联系。较大的流域或水量丰富的流域，由于河床切割深度大，一般多为闭合流域。非闭合流域与周围区域存在地下水流上的联系。小流域或者干旱、半干旱地区水量小的流域，由于河床切割深度浅，一般多为非闭合流域。在水文地质条件复杂的地区，例如，岩溶即喀斯特（Karst）地区，非闭合流域也是常见的。流域是由水系（或沟道）和坡地组成的。

水系是指流域中大小河流交汇形成的树枝状或网状结构，亦称河系，在山区小流域多为沟系。自然形成的水系多为树状结构，人工开挖形成的平原水系可为网状结构。

虽然自然形成的水系形状千变万化，但归纳起来主要有三类，即“羽状”、“平行状”和“混合状”。羽状水系的支流自上游至下游，在不同的地点依次汇入干流，相应的流域形状多为狭长形。平行状水系的支流与干流大体成平行趋势相交汇，相应的流域形状多为扇形。混合状水系的支流与干流的关系介于前两者之间，相应的流域形状也介于狭长和扇形之间。

对面积相同、水系形状不相同的流域，同样一场暴雨形成的流域出口断面流量过程线明显不同。平行状水系由于各支流汇集到流域出口断面的同时性强，所以产生较尖的洪水过程；羽状水系由于各支流汇集到流域出口断面的时间相互错开，所以产生较矮胖的洪水过程；混合状水系产生的洪水过程则介于以上两者之间。

坡地是指流域中水系以外的陆域部分。一般来说，除平原水网地区外，一个流域的水系的水面面积约占全流域面积的10%左右，其余90%左右即为坡地。按坡面的几何形状，可将坡地分为倾斜面、收敛曲面和发散曲面三种类型。

一个流域按流域内的自然分水线可以划分成若干个不嵌套的子流域，每个子流域按其内部的自然分水线又可划分成一些更小的不嵌套的小流域。这样不断地划分下去，最后得到的不可再划分的部分就是流域基本单元，它是组成一个流域的最小单位。

1.1.2 土壤侵蚀

土壤侵蚀作为全球的重大环境问题越来越受到世界各国政府及科技工作者的关注。

世界各国关于土壤侵蚀的概念和内涵不尽相同。但它们都包含了地表土壤物质的移动的共同点,在引起土壤侵蚀作用力中都包括了内外营力的作用,根据侵蚀形式可分为面蚀、沟蚀、崩塌、泻溜和滑坡、泥石流等,根据侵蚀营力可分为水蚀、风蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀等。根据自然环境条件和社会经济状况和科技发展水平分析,各国所给出的土壤侵蚀的定义和涉及的工作范围带有明显的国家和地区特色。从土壤侵蚀概念和内涵的发展演变过程可以看出,人们对土壤侵蚀和水土保持的认识是不断发展与深化的。土壤侵蚀从简单由于水力或风力作用引起的土地表面物质的移动,逐步发展到土壤在内外营力(如水力、风力、重力、人为活动等)的作用下,被分散、剥离、搬运和沉积的过程。随着人们认识的发展,土壤侵蚀的概念在不断完善、深化。

《中国大百科全书·水利卷》指出:土壤侵蚀(Soil erosion)是在水力、风力、冻融、重力等外营力作用下,土壤、土壤母质被破坏、剥蚀、转运和沉积的全部过程。美国土壤保持学会(1971)关于土壤侵蚀的解释是:“土壤侵蚀是水、风、冰或重力等营力对陆地表面的磨损,或者造成土壤、岩屑的分散与移动。”英国学者 N. W. 哈德逊(1971)在其所著的《土壤保持》一书中对土壤侵蚀的定义为:“就其本质而言,土壤侵蚀是一种夷平过程,使土壤和岩石颗粒在重力的作用下发生转运、滚动或流失。风和水是使颗粒变松和破碎的主要应力。”美国土壤保持学会及 N. W. 哈德逊对土壤侵蚀所下的定义都忽视了沉积这一过程。

土壤侵蚀导致土层变薄、土地退化、土地破碎,破坏生态平衡,并引起泥沙沉积,淹没农田,淤塞河湖水库,对农林牧业生产、水利、电力和航运事业危害极大,直接影响国民经济发展。

1.1.2.1 正常侵蚀与加速侵蚀

按发生的速度,土壤侵蚀可分为正常侵蚀和加速侵蚀。

土壤侵蚀是动态地、永恒地发生着的。在自然状态没有人类活动干预的情况下,纯粹由自然因素引起的地表侵蚀过程,其侵蚀速度非常缓慢,称之为正常侵蚀,也叫自然侵蚀(Natural erosion)。

在人类出现以前,这种侵蚀就在地质作用下缓慢地有时又很剧烈地以上万年或更长时间为周期进行着,常和自然土壤形成过程取得相对稳定的平衡,即土壤的流失常小于土壤形成的进程。因而它不仅不破坏土壤及其母质,有时反而对土壤起到更新作用,使土壤肥力在侵蚀过程中有所增高。也就是说自然侵蚀参与了土壤的形成过程。所以自然侵蚀又叫地质侵蚀(Geological erosion)。

随着人类的出现,人类的活动逐渐破坏了陆地的自然状态,如在坡地上垦殖,毁林毁草种植等,加快和扩大了某些自然因素作用所引起地表土壤破坏和移动过程,直接地或间接地造成了土壤侵蚀速度的加剧,使侵蚀速度大于土壤形成速度,导致土壤肥力每况愈下,理化性质变劣,甚至使土壤遭到严重破坏,这种侵蚀过程称之为加速侵蚀。

在当今世界人口急剧增长、粮食短缺而对食物需求急剧增加的情况下,人们更加速了对各种土地的开垦种植、陡坡开荒、毁林毁草和开沙荒、顺坡耕作、过度放牧等不合理的土地利用等活动。这些活动都不同程度地加剧了土壤侵蚀的发展,导致土壤肥力下降,生产能力降低。所以这些都是加速侵蚀的恶果。

由于人类活动所造成的土壤侵蚀,破坏了人类赖以生存的环境条件,土壤不断流失也意味着人类不断丧失生存的基础。所以我们常说的土壤侵蚀,就是指由于人类活动影响所造成的加速侵蚀。防治土壤侵蚀,进行水土保持,也就是防治加速侵蚀。水土保持学所研究的土壤侵蚀,也是针对加速侵蚀而言的。

1.1.2.2 古代侵蚀和现代侵蚀

按发生的时间,土壤侵蚀可划分为古代侵蚀和现代侵蚀。

古代侵蚀是指远在人类出现以前的地史时期内,在构造运动和海陆变迁所造成的地形基础上进行的一种侵蚀作用。古代侵蚀的实质就是地质侵蚀。

古代侵蚀的结果形成了今日的地貌轮廓,这种轮廓既是古代侵蚀的形成物,又是当代人类赖以生存的基础。因而古代侵蚀所形成的地貌条件与现代侵蚀有着密切关系。

现代侵蚀是指人类出现以后,受人类生产活动影响而产生的土壤侵蚀现象。

人类出现以后开始是刀耕火种,逐渐开发和利用自然资源。然后伴随而来的是地面植被的大量破坏,土壤侵蚀的规模和速度逐渐增加,从而又影响和限制着人们的生产活动。这种侵蚀作用往往在一年或几天时间内,就侵蚀掉在自然状态下千百年才能形成的土壤层,因而给生产带来严重的负面影响。所以这种现代侵蚀又称之为现代加速侵蚀。

应该着重指出,不管是人类出现以前的古代侵蚀,还是人类出现以后发生的现代侵蚀,在不受人为直接或间接活动影响下所发生的加速侵蚀,即侵蚀作用速度大于成土作用速度时(如地壳运动或地震引发的重力侵蚀形式等),都应称之为地质侵蚀。

综上所述,古代侵蚀所形成的地貌基础,是人类进行生产经济活动和现代侵蚀发生和发展的基础,也是防治现代侵蚀的场所。而现代加速侵蚀则是防治土壤侵蚀的主要对象。

1.2 流域侵蚀动力学过程

1.2.1 流域侵蚀动力学的相关概念

流域侵蚀产沙是在雨滴击溅、坡面径流、沟道径流的作用下而使某一流域可集水区内的土壤、母质及其他固体物质发生剥蚀、位移、堆积并向流域出口断面输移的过程。土壤在外营力作用下产生位移的物质质量,称为土壤侵蚀量。单位面积单位时间内的侵蚀量称为土壤侵蚀速度(或土壤侵蚀速率)。土壤侵蚀量中被输移出特定地段的泥沙量,称为土壤流失量。在单位时间内,通过流域出口某一观测断面的泥沙总量,称为流域产沙量。

流域侵蚀动力学是以流域为单元,研究流域各种侵蚀营力的能量转移和地表物质在内外营力作用下的分散、剥蚀和输移过程,以及流域土地利用、植被变化对流域侵蚀产沙过程的作用机制。

土壤侵蚀是地表物质在内外营力的能量输入或输出时产生的一种失衡现象,引进这种失衡的内外营力称为侵蚀营力。引起土壤侵蚀的外营力主要包括水力、风力、重力、冻融、人为作用力等;内营力主要是重力和地质构造力。

水力侵蚀是我国普遍存在的一种侵蚀形式,特别在黄土地区的流域侵蚀产沙过程中发挥着主要作用。水力侵蚀是以降雨、径流对地表物质的剥蚀、分散、输移和堆积的过程。在流域侵蚀产沙过程中,水力侵蚀以降雨作为输入或激励变量,以径流和泥沙作为输出或状态变量的一个耗散过程。在整个流域侵蚀产沙过程中,侵蚀方式和形态取决于水动力条件,而物质的输移始终以径流的状态或以水力侵蚀、输移的能量转移为纽带。

在流域中,坡面上部的侵蚀以雨滴击溅侵蚀为主,其侵蚀强度受降雨特性的影响,坡面中下部的侵蚀以坡面流的侵蚀、输移为主,陡坡段及沟坡的重力侵蚀受制于坡体自身稳定性和下渗水分条件,沟道集中径流决定了泥沙输移的方式、输移量和固体物质比例。人类活动在流域侵蚀产沙过程中发挥着重要作用,人类不合理的活动如植被破坏、过度放牧、陡坡开荒等破坏地表植被状况,加剧侵蚀发生。现代人类的生产活动,特别是各类工程建设不仅破坏地表植被、扰动土壤,还产生新的人工边坡,排放固体废弃物,产生了新的土壤侵蚀对象,也是流域侵蚀产沙的新的物质来源。

流域年平均产沙量取决于许多因素,如气候、土壤类型、土地利用情况、地形以及水库的建造等。通常难以获得足够的资料对所有的因素进行完整的分析。兰本(W. B. Langbein)应用一些流域的资料绘制了单位面积年平均产沙量-年平均降水量关系图。最大产沙量为年降水量在 305mm 的地区,因为这些地区通常没有什么护面的植被;对于较大的降雨量区域,植被繁茂,可以减少侵蚀,而当降雨量小时,侵蚀也减少了。

弗莱明(G. Fleming)利用来自全世界的 250 多个流域的资料,导出不同植被条件下年平均悬移质沙量 $Q_s(t)$ 与年平均流量 (m^3/s) 的函数关系式为

$$Q_s = \alpha Q^n \quad (1-1)$$

式中: α 、 n 为系数。

1.2.2 流域侵蚀动力学的研究内容

流域侵蚀动力学是以流域系统为单元,分析导致流域土壤侵蚀的各种内外营力的力学机制和过程,研究流域内物质在内外营力作用下的剥蚀、转运、沉积过程及流域土地利用格局与植被变化对流域侵蚀的影响过程。流域侵蚀动力学研究主要包括以下几方面的内容:

(1) 流域侵蚀产沙过程

以侵蚀因子为基础,研究流域不同地貌部位侵蚀规律,定量研究流域侵蚀过程。主要涉及以下内容:①侵蚀过程的细分,土壤、气候等侵蚀因子及其交互作用对侵蚀过程的影响研究;②泥沙在复杂坡面的分散和沉积作用以及水沙运移及汇流过程;③陡坡产沙过程、重力侵蚀发生的机制及量化研究。

(2) 流域侵蚀产沙监测

流域侵蚀产沙监测主要是利用各种监测方法与手段对流域内不同地貌部位、地貌类型的侵蚀产沙过程开展研究,以便探索流域土壤侵蚀发生机制。流域侵蚀产沙研究方法主要有以下几种:

1) 径流小区法

径流小区法是研究小流域侵蚀产沙的经典方法。径流小区一般可分为微型小区和标准小区。微型小区通常被用来研究在较大的小区上难以详细研究的基本侵蚀状态,例如,地表板结、团粒的稳定性、雨滴的溅离作用和击溅运移等,微型小区最大的好处是可用于详细研究土壤侵蚀的各个基本方面,更能接近实际地控制侵蚀过程参数。一般的标准径流小区为 $20\text{m} \times 5\text{m}$, 可用于研究坡长、坡度、植被等因素对侵蚀的影响。它是一种足以反映出细沟和细沟间侵蚀全过程的大小区。它的宽度能有效地使边界影响减小到最大限度,其长度足以使下坡的细沟发育,可测量从径流产生的坡顶开始的侵蚀。

2) 地貌调查法

地貌调查法是通过调查某一地区坡度、坡向、坡长、坡形、侵蚀基底深度、侵蚀沟形状、活动性、密度等地貌因素的方法来研究侵蚀作用的分布规律。这个方法可以帮助我们了解某一地区地形条件与侵蚀作用的关系,而根据地貌材料来分析侵蚀作用的分布特征。

3) 遥感摄影法

遥感方法是通过对遥感图像的判读、对比,从而了解某一小流域的侵蚀分布及侵蚀变化情况。通过对不同时段图像的分析,还可以了解侵蚀的动态变化情况。

4) 经验数学方法

将其他方法得到的结果用数学公式表达出来,形成了计算侵蚀强度的许多经验公式。以通用流失方程 (USLE) 应用较为广泛。

5) 示踪法

利用人为施加的示踪元素、土壤中某种元素或核素含量的分异规律来研究侵蚀产沙的状况,由于其可在不改变原始地貌的条件下研究土壤侵蚀的发生与分布,且能够精确、快速地反映出侵蚀和沉积过程变化的优点而愈来愈被重视。

(3) 流域土壤侵蚀环境研究

土壤侵蚀环境是指侵蚀产生过程中所有影响地表侵蚀的因素构成的景观综合体(景可等, 2005)。研究流域侵蚀产沙,必须分析构成侵蚀环境的结构系统。流域侵蚀环境是一个开放的系统,是一个由自然生态环境系统和社会人文环境系统组合而成的复合系统。流域自然环境系统包括气候、土壤、植被、地形、地质等方面,社会人文环境系统包括人类的各种社会经济活动的行为和生产活动等方面。流域侵蚀环境影响土壤侵蚀的过程和程度,而流域土壤侵蚀也对流域内的自然生态环境以及人类的生产活动构成影响。

(4) 基于 GIS 的流域侵蚀产沙模型研究

纵观流域产流产沙的研究,目前针对流域产流的研究要比流域产沙的研究要相对成熟,尽管产流模型中物理成因型的不多,但它的模型参数中的物理概述较明确,能够较好地解决水源划分和产汇流的计算,参数的率定和优化比较容易,模型结构比较符合客观规律。

相比之下,由于流域泥沙产生、输送和淤积等整个过程比较复杂,加之受地形地貌地质条件和人为因素的限制,使流域泥沙运动的机理难以掌握。因此,产沙模型大多为经验回归方程,此类模型缺乏明确的物理成因机制,区域性限制很大,在一些小流域尚