

WATERSHED SEDIMENT
MOVEMENT AND ITS
SIMULATION

流域泥沙运动与模拟



曹文洪 张晓明 编著



科学出版社

流域泥沙运动与模拟

曹文洪 张晓明 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以水力侵蚀过程为主线,基于动力学分析与建模方法,研究从降雨雨滴降落到地面产生溅蚀并发生径流,到剥离的泥沙从坡面进入沟道,汇入河道,直至河口的整个物理过程,系统地探讨流域泥沙动力学特性、侵蚀机理、侵蚀过程及模型模拟。本书相对完整地将流域侵蚀产沙与河流泥沙运动作为一个体系进行综合阐述,并分别以公式推导、实验成果归纳、模型构建、模拟预测等展现于读者。本书内容系统性强、理论与实践相结合,方法与应用相结合,涵盖了作者 30 年科研工作的成果。

本书可作为水利、地理、泥沙动力学、水土保持等专业的科研和教学人员参考,亦可作为高等院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流域泥沙运动与模拟/曹文洪,张晓明编著. —北京:科学出版社,2014.3

ISBN 978-7-03-040226-4

I. ①流 II. ①曹… ②张… III. ①流域—泥沙运动—模拟实验—研究
IV. ①TV142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 048944 号

责任编辑:朱 丽 聂海燕 杨新政 / 责任校对:宣 慧

责任印制:赵德静 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:30 1/4

字数:600 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

流域水沙过程包括降雨产流、汇流,以及泥沙侵蚀、输移、沉积的全过程。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。通常情况下,河流泥沙与河床演变学关注的重点是河流泥沙运动与河道冲淤过程,而土壤侵蚀与水土保持学则重点关注流域面上降雨径流和侵蚀产沙过程。因此,加强流域泥沙运动与模拟研究,揭示流域侵蚀产沙与河流泥沙运动及河床演变的内在关系具有重要理论意义与实际应用价值。

该书将泥沙的侵蚀、搬运和沉积作为一个整体,对流域与河流泥沙运动全过程进行系统研究。首先,通过分析雨滴降落过程中的力学特性,研究降雨经林冠层到达土壤产生溅蚀的整个动力过程及植被的防蚀作用;其次,以能量概念表征坡面流的水力特性和侵蚀力,采用水流功率理论分析坡面流和雨滴击溅共同作用下的输沙能力;再次,从沟道水流冲刷力、沟坡下滑力和沟坡稳定安全系数等角度进行力学分析和推演,描述沟道产沙过程,并探讨了流域泥沙输移至河道与河口的动力学计算、模拟及河口演变规律;最后,运用泥沙运动力学基本理论与方法,结合地理学、地貌学、水文学等学科知识,建立了具有物理过程基础的小流域产流产沙数学模型,在此基础上首次构建了坝系流域侵蚀产沙分布式模型,用来揭示坝系作为一个由结构、等级、功能各异的单项工程组成的复杂系统对水沙运动的调控作用。

该书作者一直致力于泥沙运动、河床演变、河口海岸、土壤侵蚀、水土保持与生态环境等学科的交叉研究,从事科研工作 30 年来,承担了大量的基础科学和工程技术项目,取得了丰富的研究成果,该书是总结、梳理和提炼作者近 30 年研究工作而形成的系统成果,它是全面论述水沙从流域、坡面、沟道、河流以至河口的侵蚀、搬运和沉积的重要著作。相信本书的出版,能为土壤侵蚀、水土保持、泥沙运动和与河床演变等学科综合和交叉研究提供新思路。

中国工程院院士:

韩英为

2014 年 3 月 16 日

前 言

从研究对象来讲,土壤侵蚀与河流泥沙分别研究同一个流域系统内的陆面和河流两个子系统;从学科分类来看,它们分属于水土保持学与泥沙运动力学及河床演变学。以往土壤侵蚀与河流泥沙常被作为独立学科分别进行研究,交叉研究相对较少。事实上,通过流域与河道的水沙运动这一纽带,可以将土壤侵蚀与河流泥沙紧密地联系在一起,流域面上水土保持措施必然影响流域的产流产沙,改变进入河流的径流和泥沙过程,河道及河口则通过冲淤变化做出相应的调整。

作者 20 世纪 80 年代初在武汉水利电力学院学习泥沙专业,此后在中国水利水电科学研究院学习水土保持和河口海岸专业,分别获得学士、硕士和博士学位。在近 30 年的科研工作中,开展了大量的流域泥沙、水库泥沙、河道泥沙、直至河口泥沙的科研工作,深感有必要从全流域角度,系统描述和刻画泥沙从地表被剥离到进入河口这一连续物理过程。因此,在 30 年科研工作成果的基础上,本人和张晓明高级工程师一起完成了本书的编写工作。

本书以水动力学、土壤侵蚀力学、泥沙运动力学、河床演变学及水文生态学等理论为基础,以水力侵蚀过程为主线,从微观到宏观,在流域尺度下系统分析与揭示侵蚀—输移—沉积泥沙动力过程,实现流域泥沙全过程模拟。全书分十章。第 1 章绪论,综述本书研究范围和国内外研究进展;第 2、3 章讨论降雨侵蚀动力学特性和坡面侵蚀动力学机理;第 4~6 章分别介绍了流域泥沙主要子过程的侵蚀动力学过程与模拟方法,包括坡面产流产沙与模型预测、沟道水沙演进与产汇流模型、流域侵蚀动力学过程;第 7 章讨论了流域泥沙输移至河道与河口的动力学计算、模拟及河口演变规律;第 8 章介绍了流域侵蚀各子过程的数学表达及坝系流域侵蚀产沙分布式模型构建;第 9、10 章分别基于 SWAT 和 GeoWEPP 分布式模型模拟预测黄土高原流域不同土地利用情景的侵蚀产沙过程。

本书出版得到流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(泥 ZY1304)、国家科技支撑计划课题(2013BAB12B01)和国家自然科学基金项目(51379008)的资助。

本书是河流泥沙与水土保持交叉和融合研究的初步尝试,由于问题的复杂性和作者水平的局限,难免会挂一漏万,不足之处敬请批评指正。

曹文洪

2013 年 2 月 10 日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水力侵蚀力学机理	1
1.1.1 降雨的力学特性	1
1.1.2 植被对降雨侵蚀力的影响	2
1.1.3 降雨再分配过程模型	5
1.2 坡面土壤侵蚀动力学过程及模拟	9
1.2.1 坡面径流侵蚀力学机理	9
1.2.2 坡面植被防蚀机理	14
1.2.3 坡面土壤侵蚀模型	16
1.3 沟道侵蚀力学机理	18
1.3.1 沟道侵蚀特征及类型	18
1.3.2 坡沟系统侵蚀产沙	19
1.3.3 沟道侵蚀模拟	20
1.4 河流输沙机理	21
1.4.1 悬移质泥沙运动	21
1.4.2 推移质泥沙运动	23
1.4.3 河床演变	24
1.4.4 河流泥沙数值模拟	26
1.5 流域土壤侵蚀过程及模拟	27
1.5.1 流域土壤侵蚀过程研究	27
1.5.2 流域土壤侵蚀过程模拟	29
第 2 章 降雨侵蚀动力学特性	31
2.1 降雨的力学特性	31
2.1.1 雨滴特性	31
2.1.2 降雨的侵蚀特性	32
2.1.3 降雨雨滴溅蚀	33
2.2 植被冠层对降雨侵蚀动力学特性的影响	37
2.2.1 试验设计	38

2.2.2	林冠降雨雨滴粒径与雨强的关系	41
2.2.3	林冠降雨雨滴粒径分布曲线	44
2.2.4	林冠降雨雨滴体积累积分布曲线及雨滴分布模型	45
2.2.5	林冠降雨雨滴动能和雨滴终速动能	47
2.3	侵蚀性降雨表征及空间变异特征	48
2.3.1	流域侵蚀性场次降雨雨型分析	48
2.3.2	流域侵蚀性降雨空间分布的不均匀性	52
第3章	坡面土壤侵蚀动力学机理	56
3.1	坡面流水力特性	56
3.1.1	坡面流及其形成	56
3.1.2	坡面流能量的表征	56
3.1.3	坡面流水力特性	58
3.2	坡面片流侵蚀	59
3.2.1	坡面流描述	59
3.2.2	坡面流侵蚀表达	62
3.3	坡面细沟流侵蚀	65
3.4	植被影响下的坡面流水动力特性	68
3.4.1	坡面流流速及其影响因素分析	68
3.4.2	森林植被对坡面流阻力的影响	72
3.4.3	森林植被对坡面侵蚀泥沙起动的影响	82
第4章	坡面水力侵蚀与产沙过程	87
4.1	坡面土壤侵蚀临界坡度	87
4.1.1	坡度影响土壤侵蚀机理	88
4.1.2	土壤侵蚀临界坡度基本理论分析	89
4.1.3	坡地土壤侵蚀临界坡度探讨	95
4.1.4	土壤侵蚀与坡度关系试验分析	97
4.2	坡面土壤侵蚀的坡长影响	99
4.2.1	坡长影响坡面侵蚀产沙理论分析	99
4.2.2	土壤侵蚀与坡长关系试验分析	100
4.3	坡面土壤侵蚀对植被结构变化响应	102
4.3.1	研究区概况及研究方法	103
4.3.2	坡面尺度植被对降雨径流和侵蚀产沙的影响	104
4.4	坡面产流产沙主导因子判析	107
4.4.1	降水与土壤侵蚀的关系	108
4.4.2	林草植被与土壤侵蚀的关系	110

4.4.3	影响坡面产流产沙的主导因子判析	114
4.5	坡面土壤侵蚀产沙模拟	115
4.5.1	坡面土壤侵蚀过程	115
4.5.2	坡面侵蚀与产沙数学模拟模型	118
4.5.3	水土保持措施下次暴雨产流计算方法	120
第5章	沟道侵蚀产沙过程	127
5.1	沟道侵蚀类型及过程	127
5.1.1	沟道侵蚀形式	127
5.1.2	沟道侵蚀的主要类型	130
5.1.3	沟道侵蚀过程	132
5.2	沟道侵蚀机制	134
5.2.1	沟道水流冲刷力	135
5.2.2	沟坡下滑力与抗滑力	136
5.2.3	沟坡稳定安全系数	138
5.2.4	沟道侵蚀产沙预测	138
5.3	沟道侵蚀模型	139
5.3.1	沟道汇流模型	139
5.3.2	沟道泥沙输移模型	142
5.3.3	沟道水沙变化的灰色系统模型预测	142
5.4	沟道侵蚀中的泥沙输移比及其测算模型	149
5.4.1	泥沙输移比的内涵	149
5.4.2	泥沙输移比的测算方法	151
5.4.3	泥沙输移比的影响因素	155
5.4.4	泥沙输移比的尺度依存性	158
5.4.5	泥沙输移比的分形特征及尺度转换途径	161
第6章	流域侵蚀产沙动力学过程	165
6.1	流域产汇流过程	165
6.1.1	产流机制	165
6.1.2	流域产流过程	171
6.1.3	流域汇流	172
6.2	流域径流侵蚀动力学过程	174
6.2.1	流域径流对降雨过程的响应	174
6.2.2	流域径流及其变率对输沙的影响	175
6.2.3	流域径流侵蚀产沙过程对侵蚀性降雨类型的响应	180

6.3	森林植被对流域土壤侵蚀影响机制	185
6.3.1	研究区概况及研究方法	186
6.3.2	流域地形地貌相似性分类的聚类分析	189
6.3.3	无林流域和森林流域的雨季径流对比分析	190
6.3.4	多林流域和少林流域对雨季径流和暴雨时输沙的影响	192
6.4	流域侵蚀产沙过程对土地利用变化响应	194
6.4.1	研究区概况及研究方法	195
6.4.2	罗玉沟流域土地利用变化	196
6.4.3	流域土地利用/覆被变化的径流调节效应	199
6.4.4	流域土地利用变化对侵蚀产沙过程的影响	206
6.5	流域水土保持措施效益分析	211
6.5.1	降雨-径流与降雨-产沙关系的建立	213
6.5.2	流域水土保持措施效益分析	215
第7章	河道泥沙输移过程	218
7.1	河道泥沙运移基本方程	218
7.2	河道与水库冲淤水动力学模型	220
7.2.1	输沙公式与参数的确定	220
7.2.2	全程统一计算的模式	226
7.3	禹门口至黄河口河道泥沙冲淤计算	230
7.3.1	泥沙冲淤验证计算	231
7.3.2	龙羊峡水库对三门峡水库和黄河下游河道的冲淤计算	238
7.4	工程治理和新水沙条件下黄河口清水沟流路行水年限模拟	241
7.4.1	黄河口流路演变历史	242
7.4.2	清水沟流路演变规律	244
7.4.3	黄河口未来的水沙变化	253
7.4.4	河口治理工程作用分析	259
7.4.5	清水沟流路使用年限模拟预测	260
第8章	流域分布式侵蚀产沙模型研究	277
8.1	次暴雨产沙数学模型	277
8.1.1	径流深公式	278
8.1.2	小流域产沙公式	279
8.1.3	次暴雨泥沙输移比	283
8.1.4	河道冲淤计算	285
8.1.5	流域产沙的数学模型	286
8.2	流域降雨水沙过程的分布式模型构建	290
8.2.1	分布式模型结构	290

8.2.2	小流域网格的划分	290
8.2.3	小流域“沟坡分离”	291
8.2.4	水流汇集网络的生成	292
8.2.5	降雨径流子模型	292
8.2.6	侵蚀产沙子模型	298
8.2.7	基于淤地坝嵌入的侵蚀产沙子模型	300
8.3	模型的率定和验证	302
8.3.1	模型的率定	303
8.3.2	模型的验证	305
8.4	基于分布式模型的水土保持措施减水减沙效益评价	308
8.4.1	减水减沙方案设计	308
8.4.2	减水减沙效益评价	308
8.4.3	减水效益分析	309
8.4.4	减沙效益分析	311
8.4.5	流域配置措施优化	312
8.5	典型坝系流域侵蚀产沙模拟	314
8.5.1	流域“沟坡分离”	319
8.5.2	输入条件确定	320
8.5.3	模型参数确定	321
8.5.4	产流产沙模拟	321
第9章	基于 SWAT 模型的流域侵蚀产沙过程模拟	326
9.1	嵌套流域降雨、地形地貌和土地利用特征分析	327
9.1.1	嵌套流域概况	327
9.1.2	研究区降雨特征分析	328
9.1.3	研究区地形地貌特征分析	331
9.1.4	研究区土地利用特征分析	335
9.2	SWAT 模型简介、空间数据库构建	336
9.2.1	SWAT 模型的结构	336
9.2.2	研究流域原始空间数据库的建立	343
9.2.3	研究流域空间属性数据库的建立	346
9.3	SWAT 模型参数检验、率定及模拟结果评价	355
9.3.1	模型参数敏感度分析	355
9.3.2	模型参数的率定	360
9.3.3	模拟结果评价	362
9.4	基于 SWAT 模型的嵌套流域水文过程模拟	365
9.4.1	南北腰小流域径流输沙过程模拟	366

9.4.2	蔡家川流域径流输沙过程模拟	372
9.4.3	北坡小流域径流输沙过程模拟	376
9.4.4	柳沟小流域径流输沙过程模拟	380
9.4.5	刘家凹小流域径流输沙过程模拟	384
9.4.6	冯家圪垛小流域径流输沙过程模拟	388
9.4.7	井沟小流域径流输沙过程模拟	393
9.5	基于 SWAT 模型模拟的嵌套小流域径流输沙过程对比分析	397
9.5.1	年输出结果对比分析	397
9.5.2	月输出结果对比分析	399
9.5.3	嵌套流域水沙运移时空协同变化分析	401
9.6	嵌套流域水沙运移对气候及土地利用变化响应分析	402
9.6.1	嵌套流域不同降水水平年水沙运移过程分析	402
9.6.2	嵌套流域土地利用变化水文响应预测分析	404
第 10 章	基于 GeoWEPP 模型的不同土地利用情景径流输沙预测	406
10.1	WEPP 模型的结构与参数率定	406
10.1.1	WEPP 模型的结构	406
10.1.2	GeoWEPP 参数率定及数据输入	408
10.2	WEPP 模型在研究区的适用性检验及输入参数校正	413
10.2.1	CLIGEN 生成气候数据的精度分析	414
10.2.2	WEPP 模型基于土壤侵蚀机理的坡面侵蚀方程解析验证	419
10.2.3	土壤、植被生长输入参数的校准和验证	422
10.3	GeoWEPP 模型对流域径流和侵蚀产沙的模拟校准与检验	424
10.3.1	模型适用性的评价指标	425
10.3.2	模型参数校准和检验	425
10.4	基于 GeoWEPP 模型的典型流域单元划分及径流与产沙模拟	432
10.4.1	GeoWEPP 模型对流域径流和输沙模拟的运行过程	432
10.4.2	GeoWEPP 模型对典型流域单元的提取	437
10.4.3	GeoWEPP 模型对典型流域单元径流和输沙的模拟	437
10.4.4	典型流域单元径流和泥沙来源分析	443
10.5	基于 GeoWEPP 模型的典型流域单元水文生态响应情景分析	446
10.5.1	不同降水水平年典型流域单元侵蚀产沙对比分析	447
10.5.2	典型流域单元森林覆盖变化对径流和侵蚀产沙的影响分析	448
10.5.3	典型流域单元径流和侵蚀产沙对林分生长阶段的响应分析	452
参考文献		453

第 1 章 绪 论

1.1 水力侵蚀力学机理

水力侵蚀是指在降雨雨滴击溅、地表径流冲刷和下渗水分作用下,土壤、土壤母质及其他地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的全部过程。

水力侵蚀是世界范围内分布最广泛、危害最为普遍的一种侵蚀形式。在陆地表面,除沙漠和永冻的极地地区外,当地表失去覆盖时,都可能发展成不同程度的水力侵蚀。在山区、丘陵区 and 一切有坡度的地面,降雨时都会产生较为严重的水力侵蚀。它的特点是以地面的水为动力冲走土壤,主要分为面蚀和沟蚀两大类。在我国黄土高原地区,伴随着面蚀和沟蚀,常发生洞穴侵蚀。

面蚀又可分为溅蚀(雨滴打击地面溅起土粒,在地表形成一个薄泥浆层,汇合成小股地表径流)、片蚀和细沟侵蚀。细沟为薄层径流汇集成细小股流对地面的侵蚀,属于线状或沟状侵蚀过程,与地面薄层水流均匀的面状侵蚀过程不同。由于细沟侵蚀大多发生于坡耕地,侵蚀深度不超过耕层,经犁耕后地面不留痕迹,也归为面蚀。

黄土高原丘陵、山地起伏,且沟谷发育活跃,形成地球上罕见的沟谷纵横、地形起伏的特殊梁峁状丘陵沟壑区,有不同的沟蚀类型。切沟侵蚀是发生在坡耕地上的一种特殊沟蚀类型,主要是人为不断耕作所致,在大于 25° 的坡耕地上最为普遍,一般由细沟演变而来。当浅沟下切深度超过耕层,无法耕作而不得不弃耕时,浅沟即发展为切沟。坡耕地一旦发生浅沟,侵蚀量可增长 1~3 倍。切沟进一步发展,径流更加集中,下切深度越来越大,沟谷两侧侵蚀加强,伴随着崩塌、滑坡和泥石流等重力侵蚀过程,沟壁不断扩张,沟槽不断加宽,形成深度可达数十米至百米的冲沟,此为冲沟侵蚀。黄土高原典型的沟道小流域即是以河沟为主系,由不同级别沟谷组成的水路网系统。

1.1.1 降雨的力学特性

雨滴击溅本质上是由于雨滴的动能做功或打击,使土壤结构遭到破坏的一种力学现象。雨滴降达地面时具有一定的能量,常能粉碎地表土壤,使表土分散,或

直接引起地表物质在坡面上的移动。同时,雨滴的打击作用会增强地面径流中的紊动强度,从而加强了径流输移泥沙的能力。再者,雨滴的打击和分散的土壤颗粒能堵塞土壤表面,形成一层结皮,结皮可以使土壤下渗性能降低,从而增大地面径流量,使地表遭受更严重的侵蚀。

雨滴的能量并非全部用于打击土壤表面,Mihara(1951)的研究表明,雨滴 2/3 的能量消耗在土壤表面形成小坑和移动土壤颗粒方面,而其余的 1/3 形成水雾。因而,只有用于侵蚀土壤的那部分能量才是降雨的真正侵蚀力。这样,我们就可以把降雨侵蚀力定义为雨滴作用于分散和击溅土壤颗粒的作用力和能量。

Wischmeier 和 Smith(1978)最早给出了降雨侵蚀力表达式:

$$R = EI_{30} \quad (1-1)$$

式中: R 为降雨侵蚀力, $100 \text{ J} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; E 为一次暴雨的总动能, J/m^2 ; I_{30} 为降雨过程中连续 30 min 最大降雨强度, cm/h 。

式(1-1)是通过相关分析所得的经验表达式,并非具有一定力学概念,但其反映了雨滴击溅和径流扰动对土壤颗粒迁移的综合影响,从侵蚀力概念上说,仍具有一定的合理性。降雨侵蚀力与地表水层的深度也有关系,降落在干硬地表上的雨滴实际上难以溅起土粒。而有研究认为,当水深在大于 3 倍雨滴直径时,其击溅效应可忽略。风是影响降雨侵蚀力不可忽视的另一因素。风可以增大雨滴的向量速度,风的侧向拖曳力可以对湿的土壤团聚体产生直接破坏作用,从而也可使其分散土壤的能力增强。

雨滴的击溅并不能直接参加产沙,其作用主要是将土壤颗粒从土体中分散,为坡面径流提供输移物质。吴震(2007)对雨滴溅蚀机理的解释为:当具有一定速度的雨滴撞击土壤表面时,它突然停止,这个突然的减速引起了水与土交界面的压力,该压力类似于管路中阀门迅速关闭所见的水锤压。雨滴与土壤表面相碰时,产生正压力,雨滴内部的高压迫使其以辐射流的形式侧向传播,形成剪切力。这样,在水土交界面高压和剪切力作用下,土壤孔隙壁遭到崩溃、压实,土壤遭到破坏,引起土壤表面颗粒的分离和运移。

1.1.2 植被对降雨侵蚀力的影响

土壤水蚀是水与土壤之间的相互作用,土壤本身的性质决定其抵抗侵蚀的能力,而坡面植被状况能够改善土壤的物理化学特性,能从各个方面影响坡面流的形成和发展,改变其水力特性,从而影响侵蚀的发生。

雨强和雨滴动能或动量对薄层水流水动力特性的影响最大,坡面击溅侵蚀的动力主要由降雨动能提供(吴普特和周佩华,1992)。了解植被对降雨动能的影响机制和定量评价植被对降雨动能的影响,是研究森林植被防治坡面土壤侵蚀机理的重要部分。雨滴动能公式:

$$E = 1/2mv^2 \quad (1-2)$$

其中

$$m = \pi/6d^3\rho; v^2 = 2ah \quad (1-3)$$

式中: ρ 为水的密度; a 为雨滴下落加速度; h 为雨滴降落高度。

从雨滴动能公式(1-2)可看出质量 m 与直径 d 有关,雨滴降落速度是降落高度的函数,因此雨滴动能与雨滴直径、降落高度有直接关系。

1) 林冠层对降雨的再分配

植被覆盖可以改变降雨雨滴动能,与其他植被类型相比,森林的结构比较复杂,林冠是森林对降雨特征和雨滴动能产生影响的第一个作用层。降雨通过林冠层后,产生分流,产生直接穿透雨、林冠滴下雨滴和溅落雨滴,出现林冠截持和干流等现象,从而在降雨雨滴大小分布及降落速度、动能等性质上发生了变化。具有不同结构特征的分林在不同特点的降雨条件下对降雨动能的改变规律,对研究水土流失规律及不同结构森林的水土保持效益来说,都是必不可少的。但目前这方面的研究还比较少,而且所得结论差别较大,即对不同林分结构、不同特征降雨的雨滴动能的作用机理还没有搞清。

不同结构的林分有不同的林冠降雨。因此,研究降雨对林地的土壤侵蚀机理应该从雨滴物理性质和林冠结构两方面进行研究。

2) 林冠层对降雨雨强与雨量的影响

在林地内,由于林冠的阻拦和截持,雨水通过林冠后,数量、雨滴大小、分布等都会发生明显的变化。在郁闭林冠下,可以认为直接穿透雨很少,林冠降雨几乎完全是由冠滴雨组成的。在未郁闭林冠下,穿透雨与冠滴雨同时存在。由于林冠的截留作用,林冠降雨量小于林外降雨量,而且由于林冠枝叶碰撞与聚集作用,雨滴分布不均匀;而穿透部分与林外雨量相同,因此林内降雨改变了实际降雨的雨强,这一般符合下面的规律:林外雨强比林内雨强分布均匀,林内降雨特性随树种、林分结构等的不同各异。

$$\begin{aligned} (I_c < c) \quad P < C \quad I_{内} < I_{外} \\ (I_c = c) \quad P > C \quad I_{内} = I_{外} \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中: I_c 为林冠实际截留强度; c 为林冠截留能力; C 为林冠最大截留量; P 为林外降雨量; $I_{内}$ 为林内降水; $I_{外}$ 为林外降水。

3) 林冠层对雨滴大小组成的影响

雨滴的大小组成称为雨谱,天然降雨的雨谱随雨型(如短阵型雨型和普通雨型)和雨强而变化。对于天然降雨雨滴大小,国内外学者先后研究了雨滴大小与雨强的关系,得出中值粒径 d_{50} (在一次降雨中以该直径为界,分析大于、等于和小于这一直径的雨滴的总体积)与雨强的相关关系式(Laws and Parson, 1943; 江忠善等, 1983)。

Best(1950)提出,雨滴的组成可以用下述分布函数表示:

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{10D}{a} \right)^n \right] \quad a = Ai^P \quad (1-5)$$

式中: D 为雨滴直径, mm; F 为直径 $\leq D$ 的雨滴累计体积所占总体积的比例, %; a 和 n 分别为随雨型和雨强(i , mm/min)而变化的雨谱分布参数; A 和 P 分别为系数和指数。

根据江忠善等(1983)的研究,黄土地区的降雨雨滴组成也符合贝斯特函数。

对于短阵雨型降雨有如下关系:

$$a = 3.58i^{0.25}, n = 2.44i^{-0.06} \quad (1-6)$$

对普通型降雨有如下关系:

$$a = 2.96i^{0.26}, n = 2.54i^{-0.09} \quad (1-7)$$

天然降雨雨滴特性与雨强和雨型关系密切,而降雨经过林冠层后不同于天然降雨,许多学者经过研究,认为林冠降雨与雨强、雨型关系不大,在大小与雨谱分布上有其自身的特点,且与林外比较有相当比例的大雨滴、小雨滴的存在。王彦辉(2001)对刺槐林冠降雨的雨谱参数与降雨类型和降雨强度关系的大量观测表明,林冠降雨的雨谱参数受降雨类型和降雨强度影响不大;而对郁闭林冠下林冠降雨特征的研究表明,林冠降雨谱也可采用同空旷地降雨谱一样的表达方式。Best(1950)雨谱公式更有利于计算雨滴动能。

4) 林冠层对雨滴终速的影响

天然降雨雨滴在降落过程中,受到重力与空气阻力的共同作用。当这两种力达到平衡时,雨滴则匀速降落,称为雨滴终速。在到达终速前,雨滴的降落速度随高度而变化。雨滴终速取决于雨滴的大小和形状。雨滴降落速度反映了雨滴动能的大小,从而也反映了雨滴对土壤侵蚀作用的强弱。因此,许多研究者对天然降雨的雨滴终速进行了研究,并得出了各自的公式。

在林内地由于树木高度有限,较大的林冠降雨雨滴在降落到林地上时可能还达不到其对应的终点速度。许多研究结果表明,林冠高度 $> 8 \sim 9$ m 时,可达到雨滴终速;林冠高度 $< 8 \sim 9$ m 时,达不到终速。准确计算不同降落高度时林冠降落雨滴着地时的降落速度,对于计算和评价林冠影响降雨动能的功能是非常重要的。吴长文和徐宁娟(1995a)采用理论方法给出了雨滴降落速度与降落高度的关系式。王彦辉(2001)引入冠心高的概念,当假设林冠降雨雨滴的初速度为零时,可用式(1-8)计算不同高度降落的冠雨雨滴速度。

$$v = v_{\infty} \sqrt{1 - \exp \left(- \frac{2g}{v_{\infty}^2} H \right)} \quad (1-8)$$

5) 林冠层对降雨动能的影响

降雨侵蚀动能主要来源于雨滴对土壤表面的打击作用。侵蚀量的大小与雨

滴的动能和土壤特性有关(周佩华等,1981),而降雨到达林冠层以后,林冠层能从根本上改变降雨的雨滴动能。

余新晓(1987b)对林冠层对降雨动能的影响进行了研究,结果表明,当华山松林冠层下限高度超过7 m时,林内透过降雨具有较大的单位雨量动能;在中雨、大雨和暴雨情况下,林冠层不能有效降低降雨动能。研究表明,小雨强时,林冠枝叶积聚雨滴作用表现突出,增大了林下雨滴动能或溅蚀明显;而在大雨强时,林冠的拦截作用减少了林下降雨动能。而且,林内单位毫米降雨的雨滴动能与雨强关系不密切;林外单位毫米降雨的雨滴动能与雨强关系密切。Wischmeier 和 Smith (1978)提出了一个描述一次暴雨动能的回归方程,被很多研究者引用:

$$E=1.213+0.89\lg I \quad (1-9)$$

式中: E 为雨滴动能, $\text{kg} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$; I 为雨强, mm/h 。

实际上,林冠降雨在整个过程中是变化的,阔叶树种在降雨初期,叶片未充分湿润时,冠滴雨一部分被叶片截留,剩下部分也由于叶片表面绒毛的作用,产生表面张力作用,暂时滞留,附着在叶子表面,积聚成大雨滴而滴落到下一层叶子上;当树叶充分湿润后,叶片上有一层水膜,叶片的绒毛对雨滴已没有作用,降落到叶片的雨滴很容易滑落,当雨强较大时,冠滴雨在冠层内层层滴落,直至穿透林冠到达地面。因此,冠滴雨与树种的叶片表面特性及林冠结构有直接关系。针叶树种由于林冠层的针叶数不胜数,雨滴与之撞击分散,或在针叶上汇聚成较大的水滴,因而落下的机会很多,这就造成了林内降雨细雨滴出现频率高,大雨滴在林地上分布均匀和雨滴中值粒径较大的特点。到目前为止,对林冠影响降雨谱和雨滴动能的研究还很少,而且未充分地把林冠作用和森林结构特征相联系起来,因此研究结果之间可比性较差(王彦辉,2001)。

森林内高大乔木能否减弱林地坡面的土壤侵蚀,一直是个有争议的问题,森林植被的地上部分及其地被物能够拦截降雨,避免雨滴直接打击地表,然而林冠是否可以起到消能的作用,取决于林冠的特性与高度。大量研究结果表明,在林冠截留未饱和时可以起到一定的消能作用;一般在高强度降雨时可以起到消能作用,在低强度降雨时作用有限;当林冠高度达到8~9 m以上时,雨滴已达终速,失去消能作用,且由于形成相当数量的大雨滴反而易增加溅蚀强度。因此,水土保持林在配置时应选择复层结构,可增大垂直郁闭度、降低林分高度、保护枯枝落叶层,其中以茂密的乔灌混交林为最佳。

1.1.3 降雨再分配过程模型

到达地表的降雨,在形成径流之前,要经过林冠截留、枯落物截持和下渗等水文过程。森林水文学的研究始于20世纪初,国内外学者对其进行了大量的研究工作,有大量的论文和专著发表、出版(马雪华等,1993)。森林水文学的研究通常

采用定位观测,对不同的森林群落或试验流域进行对比观测,分析群落内各森林水文要素的数量关系,以及不同群落和流域间森林水文要素的差别。在此基础上,建立大量的森林水文要素模型。

1. 林冠截留

多年来国内外许多学者对植被冠层截留降水作了大量的研究,获取了大量有关林冠截留量和截留率的实测数据。研究表明,冠层截留量随植物种类、冠层结构与盖度、气象条件的变化而变化。根据影响林冠截留的各种因子和截留量的关系建立的模型主要有统计模型和概念模型两类。

1) 统计模型

大多数林冠截留模型属于统计模型,不考虑生物因素和气候条件与截留的关系,只根据次降雨量和次截留量的数量关系,建立线性或非线性统计模型。

2) 概念模型

概念模型认为林冠截留由林冠吸附水量和附加截持量两部分组成,其中,林冠吸附水量即为林冠表面湿润所需的水量,它与冠层表面积和叶表面的持水能力成正比,也就是说叶面积越大叶子持水能力越强,林冠吸附量越大。附加截持量指的是在降雨过程中林冠的蒸发量,它与叶面积大小和当地的气候条件、降雨历时等有关。当空气比较干燥、风速比较大、温度比较高、蒸发比较旺盛时,附加截持量较大。

Horton 首先以此理论为基础,把林冠吸附容量简化为常数,建立了一个林冠截持降雨模型式(1-10),该模型只适用于降雨量大于林冠截持容量的降雨事件(姚丽华,1988)。

$$I_c = I_{cm}^* + erT \quad (1-10)$$

经过 Merrian(姚丽华,1988)的修正和补充,式(1-10)发展为

$$I_c = I_{cm}^* \left[1 - \exp\left(-\frac{p}{I_{cm}^*}\right) \right] + erT \quad (1-11)$$

$$I_c = I_{cm}^* \left[1 - \exp\left(-c \frac{p}{I_{cm}^*}\right) \right] + erT \quad (1-12)$$

式中: I_c 为一次降雨事件中林冠截持量,mm; I_{cm}^* 为降雨停止时树体保持的水量(用林冠投影面积上的水层厚度表示),即林冠吸附降雨容量,mm; P 为降雨量,mm; e 为湿润树体表面的蒸发强度,mm/h; r 为叶面积指数; T 为降雨历时,h; c 为降雨拦截系数,即 $(1-c)$ 为自由透流系数, c 近似等于 0.05 r 。

王彦辉(1987)在研究刺槐树冠截持降雨时,建立了单株树冠截持降雨的概念模型。在模型中,把树冠吸附降雨容量表示为树冠特征和树冠干燥程度的函数,降雨过程中湿润树体表面的蒸发强度被简化为常数,用被拦截降雨量(林外雨量