

黄土区水土保持的水沙效应

刘卉芳 曹文洪 孙中峰 著



科学出版社

黄土区水土保持的水沙效应

刘卉芳 曹文洪 孙中峰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以黄土区典型流域为对象,采用多种技术方法,从降雨开始,分析土壤入渗发生的时空异质性,研究不同时空尺度水沙运移规律;分析径流产生和发展的物理过程,建立降雨-入渗-径流的综合模型;利用单一动态度、空间动态度模型,分析流域内土地利用/覆被变化的演变过程,调整与优化区域土地利用结构;研究植被和工程对径流和泥沙的影响。

本书可供水土保持、泥沙、水利工程、生态、水文水资源等领域的科研、生产和管理人员参考,也可作为相关专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黄土区水土保持的水沙效应/刘卉芳,曹文洪,孙中峰著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047481-0

I. ①黄… II. ①刘… ②曹… ③孙… III. ①黄土区-水土保持
IV. ①S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043777 号

责任编辑:孙伯元 乔丽维 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:左 讯

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016 年 3 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:325 000

定价:96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

黄土高原分布有连续大面积、深厚疏松和易被侵蚀的黄土堆积物,在多种外营力作用下形成了千沟百壑、形态复杂多变的独特地貌特征,是我国乃至世界上水土流失、生态系统退化最严重区域之一。新中国成立以来,黄土高原是我国水土保持与生态建设的重点区域,经过几十年的治理,生态环境得到改善,入黄泥沙减少,成效显著。

流域水沙变化主要受气候变化和人类活动影响,而人类活动的影响极为复杂,既包括水土保持、退耕还林还草、水库拦沙和调水调沙等措施减沙的影响,也包括大规模开工建设项目、陡坡开荒等增加水土流失的影响。区域水土保持生态建设控制土壤侵蚀、减少江河泥沙的作用和强度如何,如何制定新形势下水土保持生态建设对策和措施等,都是亟待研究和解决的关键科学问题。为此,围绕黄土区水土保持的水沙效应这一主线,本书依托国家重点基础研究发展计划课题“森林植被调控区域农业水土资源与环境的尺度辨析与转换”(2002CB111503)、国家科技支撑计划课题“沟壑整治工程优化配置与建造技术”(2006BAD09B02)和国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水循环模拟与调控”(51021066),以晋西黄土残塬沟壑区的蔡家川小流域和陕北黄土丘陵沟壑区的马家沟小流域为研究对象,基于多年的实测资料,采用空间分析、小波分析、灰色理论、主成分分析、聚类分析等多种数理方法,从降雨入手,分析土壤入渗发生的时空异质性,研究不同时空尺度水沙运移规律;通过对径流产生和发展的物理过程进行分析,得到降雨-入渗-径流的综合模型;采用单一动态度、空间动态度模型分析流域内土地利用/覆被变化的演变过程,调整与优化区域土地利用结构;研究植被对径流和泥沙影响的量化关系。

全书共 12 章,第 1 章由曹文洪、刘卉芳、孙中峰撰写;第 2 章由刘卉芳、孙中峰、王昭艳撰写;第 3 章由刘卉芳、孙中峰、王昭艳撰写;第 4 章由孙中峰、刘卉芳、曹文洪撰写;第 5 章由刘卉芳、曹文洪、孙中峰撰写;第 6 章由孙中峰、曹文洪、刘卉芳撰写;第 7 章由刘卉芳、张晓明、池春青撰写;第 8 章由刘卉芳、朱清科、魏天兴、张晓明撰写;第 9 章由刘卉芳、曹文洪、孙中峰撰写;第 10 章由刘卉芳、曹文洪、孙中峰、鲁文、尹婧撰写;第 11 章由刘卉芳、曹文洪、王昭艳、鲁文撰写;第 12 章由曹文洪、刘卉芳、孙中峰撰写。全书由刘卉芳、曹文洪、孙中峰统稿。

在本书的撰写过程中,得到了朱金兆教授、朱清科教授、魏天兴教授、张学培副教授等专家的指导和帮助,在此表示衷心感谢。考虑到全书系统性,书中参阅

了不少参考文献,向这些文献作者表示衷心感谢。科学出版社为本书的出版给予了大力支持,编辑人员付出了辛勤劳动,在此表示诚挚感谢。

由于问题复杂和作者水平局限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	水分运移过程	1
1.1.1	降雨	1
1.1.2	径流	2
1.1.3	径流异质性	3
1.1.4	土壤水分	5
1.2	泥沙输移过程	7
1.2.1	侵蚀产沙	7
1.2.2	土地利用/覆被变化的水文泥沙效应	9
1.2.3	沟壑治理工程的水文泥沙效应	11
1.3	本书技术路线与结构	12
1.3.1	技术路线	12
1.3.2	本书结构	13
第 2 章	试验区概况	15
2.1	吉县试验区概况	15
2.1.1	地理位置	15
2.1.2	气候	16
2.1.3	地质地貌	17
2.1.4	土壤	17
2.1.5	植被	18
2.2	安塞县试验区概况	18
2.2.1	地理位置	18
2.2.2	气候	19
2.2.3	地质地貌	19
2.2.4	土壤	20
2.2.5	植被	21
2.2.6	土地利用现状	21
2.2.7	马家沟流域水土流失与沟壑治理	22

第 3 章	降雨分布及特征分析	25
3.1	降雨分布	25
3.1.1	降雨量年际分布	25
3.1.2	降雨量年内分布	27
3.1.3	流域降雨量级分布	28
3.1.4	流域暴雨雨型	30
3.1.5	侵蚀性降雨	32
3.1.6	临界产流降雨量分布	33
3.2	降雨特征小波分析	34
3.2.1	小波变换的基本原理	35
3.2.2	马家沟流域降雨量小波分析	36
3.2.3	蔡家川流域降雨量小波分析	39
第 4 章	土壤持水性能及水分入渗	42
4.1	土壤性质观测方法	42
4.1.1	土壤物理性质测定	42
4.1.2	土壤入渗测定	42
4.1.3	土壤水分特征曲线的标定	43
4.2	土壤持水性能	43
4.2.1	样地基本情况及研究方法	43
4.2.2	不同林地土壤水分特征曲线	44
4.2.3	土壤比水容量与水分分类	45
4.3	土壤水分入渗	46
4.3.1	土壤水分运动参数分析	46
4.3.2	不同地类土壤水分入渗研究	52
4.3.3	影响土壤入渗因素分析	55
第 5 章	土壤水分承载力	69
5.1	林地水分生产力	69
5.1.1	生物量分析	69
5.1.2	土壤水分与林木生长分析	75
5.1.3	林地水分条件与生产力关系	80
5.2	主要造林树种的耗水规律	84
5.2.1	林地供耗水量平衡	84
5.2.2	不同季节林地供耗水	85
5.2.3	不同林地供水与耗水	86

5.3	坡面尺度林地土壤水分承载力	86
5.3.1	不同立地条件土壤储水量聚类与生物产量状况	86
5.3.2	林地生物产量模型的选取与参数确定	88
5.3.3	最适植被生物产量计算	89
5.3.4	主要造林树种密度的确定	89
第6章	土壤水分空间异质性	91
6.1	土壤水分时空分布规律	91
6.1.1	土壤水分的垂直分布	91
6.1.2	土壤水分的季节动态	97
6.2	土壤水分入渗模型模拟及其空间变异性	100
6.2.1	土壤入渗模型概述	100
6.2.2	各地类土壤水分入渗性能模型拟合	101
6.3	土壤入渗空间异质性	104
6.3.1	简化 Philip 入渗模型	105
6.3.2	简化 Philip 入渗模型的土壤转换函数	106
6.3.3	小流域土壤水分入渗特性的空间分异	108
第7章	土地利用/覆被变化特征	112
7.1	土地利用动态及其预测	112
7.1.1	DEN 图	112
7.1.2	土地利用分类图	113
7.2	土地利用/覆被的演变过程	114
7.2.1	土地利用变化过程分析	114
7.2.2	土地资源数量变化模型	115
7.2.3	土地利用空间转移变化过程	116
7.2.4	土地利用程度变化	121
7.2.5	土地利用/覆被变化趋势	124
7.3	土地利用/覆被动态演变驱动力及驱动机制分析	125
7.3.1	自然因素	126
7.3.2	人口因素	126
7.3.3	政策因素	127
7.3.4	经济因素	127
第8章	坡面土地利用/覆被变化下的水沙效应	128
8.1	坡面土地利用/覆被对产流产沙的影响	128
8.1.1	坡面土地利用/覆被对径流的影响	128

8.1.2 坡面土地利用/覆被对产沙的影响	129
8.2 坡地经济林与水土保持林的产流产沙效应	130
8.3 坡度对坡面产流产沙的影响	133
第9章 坡面产流模型	136
9.1 影响坡面径流因素分析	136
9.1.1 降雨与径流的关系	136
9.1.2 地形因子与径流的关系	137
9.1.3 植被因子与径流的关系	138
9.2 坡面产流模型的构建	148
9.2.1 降雨-入渗-产流综合模型的建立	148
9.2.2 坡面产流-入渗模型	156
9.3 场降雨水文模型的构建	160
9.3.1 分布式水文模型技术平台概述	160
9.3.2 流域分布式暴雨水文模型(PRMS_Storm)构建	167
第10章 流域土地利用/覆被变化的水沙效应	179
10.1 SWAT模型原理及组成	179
10.1.1 SWAT模型原理	179
10.1.2 SWAT模型组成	179
10.2 SWAT的运行及模型校准	180
10.2.1 SWAT的运行	180
10.2.2 模型的校准和验证	182
10.3 模型的输出	182
10.4 基于SWAT模型的马家沟流域产流产沙模拟	184
10.4.1 流域数据库的构建	184
10.4.2 土地利用和土壤的定义及叠加	189
10.4.3 水文响应单元的分配	190
10.4.4 创建模型输入文件	190
10.4.5 基于马家沟流域的模型校准和验证	190
第11章 泥沙来源及流域尺度对洪水过程的影响	195
11.1 坡面(沟间地)与沟道(沟谷地)的输沙量	195
11.2 流域尺度变化对流域径流的影响	198
11.3 流域尺度对流域径流过程的影响	200
11.3.1 流域的选取	200
11.3.2 流域尺度变化对流域产流模式的影响	200

11.3.3	流域尺度的变化对流域洪水过程的影响	203
11.4	嵌套流域洪水过程计算模拟	205
第 12 章	流域植被/工程复合作用下的水沙效应	208
12.1	流域径流和泥沙对降雨响应	208
12.1.1	年际尺度径流和泥沙对降雨响应	208
12.1.2	月尺度径流和泥沙对降雨响应	211
12.2	流域径流和泥沙对土地利用响应	213
12.2.1	对比流域选取	213
12.2.2	土地利用现状	215
12.2.3	无林流域和森林流域雨季径流对比分析	218
12.2.4	多林流域和少林流域雨季径流对比分析	220
12.2.5	多林流域和少林流域枯水流量对比分析	222
12.2.6	天然林与人工林对流域径流调节作用	223
12.2.7	森林植被对流域产沙的影响	224
12.3	土地利用和降雨减沙理水耦合效应	226
12.3.1	对径流量影响	226
12.3.2	对侵蚀产沙影响	232
12.4	淤地坝对水沙资源调控效应	233
12.4.1	淤地坝减沙效益分析	233
12.4.2	淤地坝在流域减沙中作用	235
12.4.3	淤地坝淤积库容分析	240
12.4.4	单坝拦沙效益比较	241
12.5	不同治理范式下流域侵蚀强度变化	243
参考文献		245

第 1 章 绪 论

黄土高原涉及我国青海、甘肃、陕西、山西、河南、宁夏、内蒙古七个省(自治区),地貌形态非常独特,与深海沉积物、南极冰盖和格陵兰冰盖并称为研究全球变化的三本秘籍,是我国重要的农牧业及能源基地。黄土高原也是我国水土流失最严重的地区和黄河泥沙的主要来源区,其水力侵蚀占整个黄土高原流失面积的 85%以上,中度以上水土流失约占总流失面积的 70%,主要地貌特征为沟谷发育活跃,地形破碎,沟深坡陡;降水特征为降水年季分布极不均匀,暴雨集中,降雨强度大。因此,开展气候变化与人类活动的水沙效应研究,对黄土高原水土流失综合治理具有重要意义。

1.1 水分运移过程

1.1.1 降雨

降雨是影响侵蚀的主要动力因素之一,是产流的主要输入项,对径流产生重要影响,特别是降雨的时空变化对径流具有决定性作用。20 世纪 80 年代以来,不同学者从多角度开展了降雨与侵蚀的关系研究,在天然降雨雨滴特性、降雨动能、侵蚀性暴雨研究方面取得了进展。郑粉莉(1989)建立了坡耕地降雨和径流动能与细沟侵蚀量的统计模型,周佩华等(1981)、高学田等(2001)分别提出了溅蚀量与降雨动能呈指数关系,江忠善等(1985)、吴普特(1997)则分别建立了溅蚀量与降雨动能、降雨强度及坡度间的综合关系。

降雨对土壤侵蚀的能力用降雨侵蚀力来表示,它是描述降雨造成土壤侵蚀潜在能力的定量指标。降雨侵蚀力与降雨量、降雨历时、降雨强度和降雨动能有关,反映了降雨特性对土壤侵蚀的影响。国内对降雨侵蚀力(R)已有大量的研究。其中,估算年 R 值多采用年雨量和月雨量因子两种方法。王万忠等(1996)研究认为,最大 30min 雨强可以作为我国降雨侵蚀力计算的最佳参数,并建立了次降雨侵蚀力、年降雨侵蚀力和多年平均降雨侵蚀力的简易计算方法。国内其他一些研究以 EI 结构形式为基础,提出了针对具体区域的 R 值的计算方法,降雨侵蚀力因子 R 值具有较强的地域性,在尺度转换使用受到限制。因此,开展此项研究仍是一项长期工作。

相对国内研究而言,国外关于降雨侵蚀力的研究较为成熟。Wischmeier 等

(1978)经统计分析发现,降雨的总动能与其最大 30min 雨强的乘积 EI 指数和土壤流失量的关系最为密切,并建立了年均降雨侵蚀力因子的经验公式,在我国多个区域进行应用。

1.1.2 径流

径流形成过程通常可以归结为产流和汇流两个阶段,前者是由次洪降雨量预报所形成的产流量(净雨量),后者将产流量变为出口断面的流量过程。径流的形成是一个错综复杂的物理过程,为了揭示降雨径流的机理,径流理论应运而生。径流理论是在 19 世纪以后逐步建立和发展起来的,是水文学的重要分支学科,旨在探讨不同气候和下垫面条件下降雨径流形成的物理机制、不同介质中水流汇集的基本规律以及产汇流计算方法的基本原理,是研制确定性水文模型、短期水文预报方法和解决许多水文、水资源实际问题的重要理论依据。

1856 年达西(Darcy)提出渗透力学基本定律——达西定律和 1871 年圣维南(Saint-Venant)导出的明渠缓变不恒定流的基本微分方程组——圣维南方程组,为研究径流奠定了理论基础。20 世纪 30~60 年代,径流理论取得了重大突破。1935 年霍顿(Horton)提出了著名的霍顿产流理论,阐明了自然界超渗地面径流和地下水径流产生的机制。20 世纪 60 年代初,中国水文学者通过对大量的实测水文资料的分析研究,得出了湿润地区以蓄满产流为主和干旱区以超渗产流为主的重要论点,建立了实用的流域产流量计算方法,从而使霍顿产流理论在实际中得到了较为广泛的应用。在汇流方面,1932 年谢尔曼(Sherman)创立的单位线方法,1934 年佐贺(Zoch)建立的线性水库及瞬时单位线概念,1938 年麦卡锡(MacCarthy)首次使用的马斯京根(Muskingum)洪水演算法,1957 年加里宁-米留柯夫发明的特征河长原理和纳希(Nash)发明的串联线性水库汇流模型,以及 20 世纪 60 年代中国水文学者对马斯京根法的理论解释和提出的长河段连续演算方法等,已成为现行实用汇流计算方法的基础。20 世纪 70 年代以来,径流理论发展的主要标志是《动力水文学》(Dynamic Hydrology)、《水文系统线性理论》(The Liner Theory of Hydrology Systems)、《山坡水文学》(Hillslope Hydrology)等一批中外学术专著的相继问世,以及非霍顿产流理论、计算河流水力学和地貌瞬时单位线等理论的先后提出,表明产汇流理论已经进入成熟期。

降雨量与地表径流无论在小流域还是大流域都有密切关系。有学者指出,小雨量时地表径流与降雨量之间呈指数关系,而雨量较大时,两者之间为线性关系。还有学者认为前期降雨决定了径流量和径流产生的时空分布。前期降雨小,地表径流的产流时间就会推迟,而且降雨终止后径流延续的时间也短。此外,降雨与地表径流的关系受下垫面影响较大。在旱季往往是草地等植被较差的地类,其前期土壤含水量明显低于植被较好的林地,于是这些地类的土壤在降雨初期,入渗

能力就可能大于植被较好的林地,其相应的产流时间要晚,产流量也小。在不同的试验区和试验条件下人们得到的结论也有所不同,但坡面因子影响地表径流却得到了共识,黄土区坡度在一定的范围内时,坡度与地表径流量呈正相关关系。

综上所述,地表径流是降雨与下垫面综合影响的结果。下垫面因素主要包括植被、坡度、土壤等,影响地表径流的因子很多,关联性十分复杂,不同区域因气候、土壤、母质等不同,结论也不尽相同。

1.1.3 径流异质性

空间异质性(spatial heterogeneity)是20世纪90年代生态学研究的一个重要的理论问题,同时也是生态学家研究不同尺度的生态系统功能和过程中最感兴趣的问题。将空间异质性定义为系统或系统属性在空间上的复杂性(complexity)和变异性(variability)。系统属性可以是生态学所设计的任何变量,如植被类型、种群密度、生物量、土壤有机质含量、土壤养分含量、土壤入渗、坡面径流等。空间异质性定量分析可从两方面考虑:一个是空间特征(spatial characteristics);另一个是空间比较(spatial comparison),且已证明是对空间异质性分析的有效途径。目前已对不同系统属性的空间异质性进行了一定的研究,有些已成为其领域研究的重点。

无论在大尺度上还是小尺度上观察,径流空间异质性均存在。即使在环境因子相同的区域内,同一时刻径流在不同空间位置上也具有明显差异。目前对径流空间变异的研究已成为水文学研究的重要内容之一,国内外关于径流空间异质性有过很多的研究。Zonneveld(2003)研究表明,不同的坡度上植被对径流的拦截作用造成局部水分运动的变异。Bergkamp(1998)进行了四个大尺度的降雨模拟试验,发现在灌丛地上试验开始不久就出现小尺度的径流,与优先径流路径处相比,在灌丛周围出现较快的非均一入渗速率,从而阻止了大于1m范围内径流的产生;而在休耕地则没有观察到地表水分再分布的现象,因此,环境因子促进水分的非均一入渗,进而促进土壤对降雨的保蓄性;并指出在非连续的环境中,在小尺度上测定的径流量不能直接外推到大尺度环境中。不同的坡面部位降雨入渗有很大的差异,径流系数与坡向和坡面的部位有关,植被覆盖度大的情况下入渗也较大。

目前,研究径流空间异质性的方法很多,主要是经典统计方法、地统计方法以及标定理论的应用。

1. 经典统计方法

经典统计方法即指传统的统计方法,通过计算观测变量的均值方差、标准差、峰度、偏斜度、变异系数等描述性地分析变量的分布及变化。经典统计方法以观测变量间独立、正态分布为前提,进行统计分析之前通常需要概率密度函数验证

变量的分布特性,如不遵循正态分布则需要转换,使统计分析科学、合理。径流异质性研究中往往通过计算各特征参数(如土壤水分运动参数、土壤入渗、径流阻力的统计特征值)分析径流空间异质性。经典统计分析方法虽然简单易行,但由于径流在空间分布上并非独立分布,它们之间具有一定的空间相关性。

2. 地统计方法

为了进一步揭示事物的变异结构以及变异如何体现于空间分布,地统计方法逐渐应用于异质性分析。

地统计学是 20 世纪 80 年代以后用于分析研究空间异质性的一种有效方法。首先由法国学者 Matheron 于 20 世纪 60 年代建立起来,由于它使传统的地学方法与统计学方法相结合,形成了完整的公式系统,因此又称地质统计学。地统计学以区域化变量、随机函数等概念为基础,并以均值稳定和二阶平稳(即具有相同距离和方向的任意两点的方差是相同的)为前提,通过计算核心函数半变异函数,分析研究自然现象的空间变异问题。半变异函数计算公式如下:

$$2\gamma(h) = D[y(x) - y(x+h)]$$

式中, $\gamma(h)$ 表示半方差函数, h 为位差。地统计学是分析土壤空间变异的强有力手段,被广泛运用于异质性研究中。但由于径流异质性是多变量相互作用的结果,而地统计学目前只对单个变量进行分析,其应用受到一定的限制。

3. 标定理论

标定理论基于相似介质理论发展起来,它假定研究对象几何相似、形态相似、动态相似。所谓标定即是空间变异的关系,通过对每一点选取适当的标定系数(标定因子或比例系数),将其标定为对各点均适用的统一的关系,代替各点均不相同的关系。标定理论被广泛应用于水力学研究中,作为一种工具,标定理论可借助于标定系数近似异质性后应用到其他异质性研究中。在土壤水力特性中,通过标定系数反映土壤水分特征曲线,异质性的数据分析可大大简化。然而在径流研究中,自然条件下标定理论严格的三个相似假定很难被满足,因此,标定理论应用于径流异质性的研究受到很大限制。

此外,空间异质性的研究方法还包括分形与分数维方法、时序分析法、随机模拟方法。分形是指在形态或结构上存在着相似性的几何对象,利用分形理论中的重要参数分维,可以揭示不同物体的复杂程度以及它的动态演化过程。时序分析以时间序列和空间变异周期序列分析为主要特征,用自相关和空间自相关系数描述区域化变量和时间序列变量两种类型变量的空间结构,运用自回归模型和空间状态模型,借助于频谱分析与协频谱分析、动态数据时域分析、状态空间法三种方法完成时空异质性分析。由于空间协方差对数据要求过高,在实践中一般不容易

满足其要求,因此时序分析法具有一定的局限性。随机模拟模型关键在于模拟随机分量,将区域化变量变化序列的随机项进行标准化处理后,用自回归模型求解时刻的随机变量,因此可以获得较为准确的随机变量变化规律。GIS 应用于异质性分析是近年的一种研究发展趋势,它通过采集、管理空间数据,运用各子系统、模块提供的空间分析、地统计分析等工具分析数据。由于 GIS 的特定性质属于空间型,有别于一般的统计型信息系统。以上各种方法各有优缺点,但应用于径流空间异质性较少,在今后的研究中应该尝试结合应用其中一种或几种揭示径流异质性。

1.1.4 土壤水分

1. 土壤水分入渗

降雨有一部分会入渗到土壤中,形成壤中流,其余的会形成地表径流。土壤入渗过程为非饱和的渗流过程,一般降雨初期土壤入渗能力很强,很多情况下大于降雨强度值,这时渗透率等于降雨强度值。随着入渗量增加,土壤入渗能力逐渐减小,当土壤入渗能力减小至等于降雨强度后,土壤实际入渗速率开始小于降雨强度,地表将会产流。此后入渗速率仍不断减小,并沿一条下凹曲线逐渐趋于一个稳定值。我国黄土高原多为超渗产流,即降雨强度大于土壤入渗速率,形成径流。坡面产流模型必须与土壤入渗耦合起来,入渗量的大小直接影响了产流量的多少,对坡面侵蚀量影响很大,增加入渗量是目前控制土壤侵蚀的途径之一。入渗是流体在土壤这种多孔介质中的运动,是一种非恒定非均匀的复杂流动,随时间和空间均发生变化。

目前描述入渗的公式分为经验公式和理论型公式。广泛使用的入渗经验公式有以下三种: $i = Bt^{-a}$, $i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-\beta t}$ (Horton, 1935), $i = i_c + \alpha(W - I)^n$, $W = (\theta_s - \theta_i)d$ (Holtan, 1961)。Holtan 公式是美国农业部曾经推荐的公式,并对美国土壤中的大部分提供了所需参数的用表。但它难以精确地描述一个点的入渗,可以粗略估算流域的降雨入渗。Horton 公式在中国的运用非常广泛,但它属于经验公式,所涉及参数并非土壤物理性参数,不一定具有通用性。而且,20 世纪 60 年代以来,许多水文学家发现,这种理论仅适合于植被稀疏、土质贫瘠的山坡,是地表径流的一种极端;而对植被稠密、土壤覆盖层深厚的山坡,则存在另一种极端的壤中流模型。在这两种极端之间,存在许多中间类型。

入渗理论型公式主要有 Green-Ampt(1911)公式、Philip(1957)公式和 Smith-Parlange(1978)公式。其中,Green-Ampt 公式是最早提出的基于毛管理论入渗模型。假定入渗时存在明显的水平湿润锋面,将湿润和未湿润的区域截然分开,然后运用达西定律得到入渗速率与入渗量的关系以及入渗速率随时间的变化。

Mein 等(1973)将其加以改进,用于稳定降雨情形。Chu(1987)进一步将 Green-Ampt 模型推广运用至降雨强度随时间变化的过程,因为实际的降雨过程都不会是均匀雨强。其后该公式又被推广至土壤性质不均一的分层土壤情形。Philip 公式是根据土壤水分运动方程并假设垂直入渗条件下的解为级数形式而得出的。

当其级数解取两项时,入渗速率可表示为: $i = A + \frac{B}{\sqrt{t}}$ 。Smith 等(1978)也从土壤

基本方程出发,通过一种半解析迭代方法,导出了任意降雨强度下的入渗公式。对于非饱和导水率在接近饱和的范围内不同的变化规律,其公式有不同的形式,公式的具体形式相对比较复杂。此外其他比较著名的模型还有 Childs 提出的以土壤导水性为参数的入渗指数方程, Jieckee 提出的以压力梯度和渗透系数为参数的渗透方程。还有学者(沈冰等,1993)在其研究中使用了更基本的土壤水分运动方程: $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K(\theta)$ 或者 $c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K(\psi)$, 但这种方法计算较为复杂,所需参数的获取也更为困难,目前在产流计算中尚未被广泛使用。

2. 土壤水分生产力

土壤水分生产力反映了土壤水分因子与生物量之间的定量关系。对黄土区土壤水分生产力的研究已经进行的较多,尤其是对主要造林树种的土壤水分生产力研究进行的比较多。韩仕峰等(1993)研究黄土区水资源时指出,黄土区土壤水分利用偏低。李凯荣等(1990)研究刺槐水分生产力时表明,其林地水分利用率不到 30%,阴坡水分利用率接近阳坡的 2 倍。刘康等(1989)认为阳坡、半阳坡刺槐的生产力与水分利用率不同。此外,刘增文等(1990)研究了油松、柠条、沙棘、旱柳等树种土壤水分生产力,也有学者对沙打旺等草种进行水分生长力研究,他们得出的结论是黄土区由于林分配置不当,土壤水分生产力较低,草地的生产力 > 灌木 > 乔木。

在黄土高原植被生产力模型估算方面,我国从“七五”期间就开始进行。黄土高原综合考察队曾运用里思模型对整个黄土高原的第一性生产力进行估算,并绘制出黄土高原植被生产力图,同时袁嘉祖等(1991)运用仿真模型估算不同区域植被生物量。魏天兴等(2001)对黄土丘陵区植被第一性生产力也做过研究,这些研究在模型估算中均采用温度、降水指标。徐学选等(2003)建立了植被生产力与土壤水资源结合的半理论半经验模型对黄土高原植被进行估算。马霭乃(1990)研究刺槐生长时,得出黄土区年降雨量大于 500mm 的地区造林密度不应该大于 150 株/亩。魏天兴等(2001)在研究刺槐和油松林耗水规律时,得出在晋西黄土区刺槐和油松的水分营养面积在不同坡位和不同生长期是不同的,随着林木的生长,

水分营养面积随之变动,并计算了油松和刺槐的水分营养面积的动态变化序列表。

3. 土壤水分异质性

土壤水分是土壤物理性质中最重要的因素,前期降雨对产流的影响主要表现在土壤水分含量上,所以土壤水分含量影响到降雨入渗,从而影响地表、地下产流。此外,土壤水分是流域水量平衡及地区水文循环中的重要因子,土壤水分动态变化是诸多环境因子综合作用的反映,准确掌握土壤水分动态变化规律,及时了解本区的水分收支状况,可以在流域整体水平上实现有限的水资源优化配置。

土壤是一个时空变异连续体。土壤特性在不同空间位置上存在明显的差异,即土壤特性的空间变异性。刘春利等(2005)研究表明,黄土高原土壤含水率在垂直剖面方向、坡长方向及垂直于坡长方向均具有不同的变异特征。潘成忠等(2003)研究表明,地统计学对有浅沟微地形存在的陡坡坡面土壤含水率变异特征不能进行很好的描述;也有学者研究认为小尺度上土壤含水率具有高度的空间异质性。已有的研究大都为单一土地利用类型与土壤含水率空间变异性之间的关系研究,而对不同土地利用方式下土壤水分空间变异性的对比研究相对较少。

1.2 泥沙输移过程

1.2.1 侵蚀产沙

土壤侵蚀和流域产沙是地球表面普遍存在的一种既密切联系又有所区别的自然现象,是侵蚀循环的主要过程之一。土壤在外营力(风、水、冻融等)作用下发生的分散移动可称为土壤侵蚀。被侵蚀的土壤一部分留存原地,一部分被搬运。被侵蚀的土壤若沿沟道或河道向下游运动,最终到达流域出口则称为流域产沙。由此可见侵蚀和产沙是一个统一的过程,并非所有的侵蚀都能形成产沙,即由于不是全部被侵蚀的物质都能到达流域出口断面,其中的一部分(甚至是大部分)将在中途落淤,因此,一般说来侵蚀量大于产沙量。

土壤侵蚀定量研究主要是确定土壤侵蚀在时间和空间上量的分异状况,解决侵蚀量在某特定地理景观中不同地貌单元或土地利用单元上的空间分异规律,并搞清侵蚀量在不同历史时段内的变化规律以及预测将来一个时段内的变化趋势。对土壤侵蚀进行定量描述的指标有土壤侵蚀量、土壤侵蚀程度、土壤侵蚀强度。土壤侵蚀模型是进行土壤侵蚀量预测、土壤侵蚀危害评估、水土保持措施布置的基础工具,因此土壤侵蚀模型的构建已经具有非常重要的意义。侵蚀产沙问题的研究始于20世纪20年代,60年代以后,侵蚀产沙的机理研究逐渐得到了重视,建