

Process and Mechanism of Soil Erosion

土壤侵蚀过程与机制



余新晓
张晓明 等/著
李建劳



科学出版社
www.sciencep.com

土壤侵蚀过程与机制

余新晓 张晓明 李建劳 等 著

国家自然科学基金项目 (40871136)

国家重点基础研究发展计划项目 (2002CB111502)

资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书运用水动力学与侵蚀理论,以室内人工降雨模拟试验为基础,研究森林植被影响下降雨雨滴动能、坡面薄层水流流态、坡面流阻力系数变化规律、坡面流泥沙运动规律,建立坡面流阻力系数公式、泥沙起动临界剪切力公式,坡面流侵蚀数学模型,以探讨坡面土壤侵蚀过程与机制。在坡面土壤侵蚀过程与机理研究基础上,以黄土丘陵沟壑区的甘肃省天水市典型流域及更大尺度的无定河流域为研究对象,通过分析流域降雨时空变化、景观格局演变及地形地貌分形特征,辨析流域水沙运移规律及其尺度分异规律;研究流域地形地貌分维与侵蚀产沙的耦合关系;基于土壤侵蚀预报模型 WEPP 和水文模型 SWAT,研究各尺度流域土地利用/森林植被变化下的水文生态响应,进而探讨土地利用/森林植被变化影响下多尺度流域水文生态过程及侵蚀机制。

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的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤侵蚀过程与机制/余新晓,张晓明,李建劳等著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-022643-3

I. 土… II. ①余…②张…③李… III. 土壤侵蚀-研究 IV. S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113547 号

责任编辑:罗 吉/责任校对:钟 洋

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—1 500 字数:581 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

内 容 简 介

本书运用水动力学与侵蚀理论,以室内人工降雨模拟试验为基础,研究森林植被影响下降雨雨滴动能、坡面薄层水流流态、坡面流阻力系数变化规律、坡面流泥沙运动规律,建立坡面流阻力系数公式、泥沙起动临界剪切力公式,坡面流侵蚀数学模型,以探讨坡面土壤侵蚀过程与机制。在坡面土壤侵蚀过程与机理研究基础上,以黄土丘陵沟壑区的甘肃省天水市典型流域及更大尺度的无定河流域为研究对象,通过分析流域降雨时空变化、景观格局演变及地形地貌分形特征,辨析流域水沙运移规律及其尺度分异规律;研究流域地形地貌分维与侵蚀产沙的耦合关系;基于土壤侵蚀预报模型 WEPP 和水文模型 SWAT,研究各尺度流域土地利用/森林植被变化下的水文生态响应,进而探讨土地利用/森林植被变化影响下多尺度流域水文生态过程及侵蚀机制。

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的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤侵蚀过程与机制/余新晓,张晓明,李建劳等著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-022643-3

I. 土… II. ①余…②张…③李… III. 土壤侵蚀-研究 IV. S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113547 号

责任编辑:罗 吉/责任校对:钟 洋

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—1 500 字数:581 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

20 世纪下半叶以来,随着世界经济高速发展,全球自然资源以前所未有的速度急剧消耗,土地资源不断减少且质量持续下降,水资源日益短缺,森林赤字逐渐扩大,生态环境日趋恶化,生物多样性锐减,灾害频发。这些问题成为制约全球社会经济可持续发展的重要限制因素,也引起全世界的普遍关注。黄土高原是我国具有特殊地形地貌特征和气候特点的区域,其土地退化、水资源失衡和水土流失严重成为黄河流域面临的重大问题,也是中国之忧患。

黄河流域生态环境的改善离不开水土保持重大基础理论问题的研究,其中土壤侵蚀过程与机制的研究更是基础之基础,其为土壤侵蚀模型研究、水土保持措施防蚀机理探讨、流域生态过程和水水土保持措施配置、大尺度水土流失和水水土保持的格局与规律以及水土流失与水土保持环境效应评价等提供理论支撑。土壤侵蚀过程包括坡面和流域两个尺度,涉及土壤—森林植被—大气界面、坡地和流域三个生态过程的研究。三个生态过程的研究和机制的探析在于模型的构建、措施的配置以及依托模型对配置措施的环境效应评价。

此书是余新晓教授及其团队在国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)课题“森林植被对土壤侵蚀过程的调控机理”等研究基础上编著而成的。此书立足于“土壤侵蚀过程及其机制”这个重大基础理论问题和国际土壤侵蚀学科前沿,以大量翔实的数据为基础,结合 3S 技术,采用动力水文过程测定技术、景观生态学测度方法及成熟的水文观测方法,从坡面和不同尺度流域探讨了土壤侵蚀过程与机制,并构建了相应尺度的侵蚀模型,结合国际流行的土壤侵蚀分布式模型,分析了水土保持措施和土地利用格局配置模式,评价和预测了不同尺度水土保持措施布局下的生态环境效应。

此书深刻剖析了坡面和流域在森林植被等措施影响下的土壤侵蚀机理,同时又囊括了模型的构建与生态环境效应评价等研究,不仅对水土保持、土壤侵蚀和生态学等学科教学和科研人员颇有裨益,同时也会为地理、环境和景观生态等领域的研究和管理人员提供有价值的参考,是以为序。

中国工程院院士

李文华

2009 年 1 月

前言

长期以来,人类为了满足不断增长的物质与文化需求,从而加速开发利用自然资源。在物质文明发展的同时,人与环境的关系也由和谐发展到矛盾的显著激化。特别是进入 20 世纪以后,各种严重的区域性、全球性环境问题相继出现,这不仅表现在地球上人口激增、资源短缺,而且同时还表现为各种自然和环境灾害频繁发生,危害人类的安全、生产和生活。土地资源是人类生存和发展的基础,是人类最基本的环境资源。由于森林的砍伐、草原破坏、水土流失和土地荒漠化问题日趋严重,因此直接影响到人们的生存环境、国土安全、民族团结和社会稳定。

黄土高原地处半湿润半干旱地区向干旱地区的过渡地带,水资源不仅分布不平衡,总体表现为短缺,而且在气候、土壤、土地覆被上均表现出强烈的过渡性特征,是水文生态对土地利用变化响应最为敏感的区域。人类不合理的活动,使历史上曾是草原夹杂其中、原始森林遍布的山峦丘阜和低地平川变为沟壑纵横、梁峁起伏的破碎景观。为此,人类开展了大量的科学研究和技术示范以改变现状,重建秀美山川。

流域是土壤侵蚀的基本单元,坡面产沙又是流域土壤的直接驱动,坡面及流域的侵蚀与产沙不仅是一个复杂的物理过程,而且也是一个复杂的系统。因此,土壤侵蚀过程及其机制、土壤侵蚀模型、流域生态过程和水土保持措施配置、大尺度水土流失与水土保持的格局与规律和水土流失与水土保持环境效应评价等重大基础理论研究成为水土保持领域的热点及急需探讨的难点。土壤侵蚀过程与机制研究及土壤侵蚀模型建立与运用均是以坡面或流域覆盖或覆被条件变化为载体的,这些变化会导致环境水文行为改变,从而又会影响整个水文生态过程与机制。

本研究以国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)“森林植被对生态环境调控机制研究(2002CB111502)”为依托,首先从林地坡面水蚀的动力学相关过程入手,研究植被介入后对降雨重新分配及改变径流而导致其对地面侵蚀能力的变化,并探讨植被各个垂直层次对坡面水蚀作用的动力学机理。同时,本研究以黄土高原地区典型多尺度耦合流域为研究对象,从水文学和生态学的角度揭示黄土高原典型生态敏感区流域土地覆被变化及其水文生态功能响应机理,阐释土地利用变化及森林植被对流域水文生态过程的影响和调控机制,并在森林植被水文生态过程的作用尺度、森林植被理水调洪与保持水土等生态环境功能调控机理、森林植被水文过程尺度转换等方面取得突破,为我国黄土高原土地利用规划调整、我国森林生态系统的合理保护和利用以及林业生态工程建设提供基础理论依据与决策依据。

本书是作者在系统总结以上研究成果的基础上形成的,全书共分 10 章,主要内容及编写人员如下:第 1 章绪论,由余新晓执笔;第 2 章森林植被——坡面土壤侵蚀过程动力学特性分析,由张颖和余新晓执笔;第 3 章森林植被影响条件下坡面土壤侵蚀动力学模型,由张颖、谢宝元执笔;第 4 章流域土地利用/森林植被景观格局演变,由武思宏和余新晓执笔;第 5 章流域降雨时空异质性研究,由余新晓、张晓明和李建劳执笔;

第6章流域土地利用/森林植被变化下的水沙运移尺度效应分析,由张晓明、余新晓和张满良执笔;第7章流域土地利用/森林植被变化下洪水径流及输沙过程随尺度变化规律,由张晓明、陈丽华和余新晓执笔;第8章基于WEPP模型的多尺度流域径流和侵蚀产沙模拟,由张晓明、余新晓和武思宏执笔;第9章土地利用/森林植被变化下的流域地形特征与侵蚀产沙耦合关系,由余新晓、张晓明和武思宏执笔;第10章基于SWAT模型的无定河流域LUCC的水文生态响应,由余新晓与杨永强执笔。全书由余新晓、张晓明审定统稿。

本研究成果是多位同事经过多年的共同努力完成的。参加研究的主要人员有:余新晓、张晓明、李建劳、谢宝元、陈丽华、秦富仓、张满良、张志强、牛建植、张颖、杨永强、武思宏、岳永杰和刘彦等。在研究过程中,课题组全体研究人员密切配合,相互支持,圆满地完成了研究任务,在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢!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全力的支持和帮助。

余新晓

2009年1月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流域土壤侵蚀（水文生态）过程与机制	1
1.1.1 流域土壤侵蚀过程研究	2
1.1.2 森林植被防止坡面土壤侵蚀机理	7
1.1.3 土地利用/森林植被演变对流域侵蚀过程的影响	19
1.1.4 流域土壤侵蚀过程模拟	23
1.1.5 存在的问题及发展趋势	27
1.2 研究区概况	29
1.2.1 甘肃天水研究区概况	29
1.2.2 无定河流域概况	41
1.3 研究方法	50
1.3.1 森林植被影响下坡面土壤侵蚀动力学过程	50
1.3.2 土地利用/土地覆被影响下的土壤侵蚀过程	56
第 2 章 森林植被——坡面土壤侵蚀过程动力学特性分析	69
2.1 植被冠层对降雨侵蚀动力学特性的影响	69
2.1.1 林冠降雨雨滴粒径与雨强的关系	69
2.1.2 林冠降雨雨滴粒径分布曲线	71
2.1.3 林冠降雨雨滴体积累积分布曲线及雨滴分布模型	73
2.1.4 林冠降雨雨滴动能和雨滴终端动能	74
2.2 降雨条件下森林植被对坡面流水动力特性的影响研究	76
2.2.1 坡面流流动型态的确定和判别	76
2.2.2 坡面流流速及其影响因素分析	78
2.2.3 森林植被对坡面流阻力的影响	82
2.3 森林植被对坡面产沙过程的影响	91
2.3.1 不同处理坡面小区泥沙颗粒起动规律	92
2.3.2 单颗粒泥沙起动模式及受力分析	95
2.3.3 坡面泥沙起动临界剪切力研究	99
第 3 章 森林植被影响条件下坡面土壤侵蚀动力学模型	103
3.1 森林植被影响下坡面产流模型	103
3.1.1 坡面流连续方程	103
3.1.2 降雨条件下坡面小区坡面流动量方程	105
3.2 森林植被影响下坡面土壤侵蚀动力学模型	107

3.2.1	森林植被影响下土壤侵蚀动力学模型建立	107
3.2.2	森林植被影响下坡面土壤侵蚀动力学模型求解	108
3.2.3	模型验证	111
3.3	森林植被对坡面流侵蚀影响模拟	112
第4章	流域土地利用/森林植被景观格局演变	114
4.1	流域土地利用/森林植被动态演变过程	114
4.1.1	土地利用/森林植被动态监测方法	114
4.1.2	土地利用/森林植被时空变化	114
4.1.3	土地利用/森林植被变化分析模型	116
4.1.4	土地利用/森林植被变化过程分析	121
4.2	流域土地利用/森林植被动态变化的驱动力分析	136
4.2.1	自然因素	136
4.2.2	人口因素	137
4.2.3	政策因素	137
4.2.4	经济发展	137
4.3	流域土地利用/森林植被的景观空间格局动态变化分析	138
4.3.1	景观单元特征指数的提取及生态意义	138
4.3.2	研究流域土地利用景观格局动态变化	140
第5章	流域降雨时空异质性研究	149
5.1	流域降雨的统计分析	149
5.1.1	流域降水量的年际、年内分布规律	149
5.1.2	流域侵蚀性场降雨雨型分析	152
5.2	流域降雨空间分布的不均匀性研究	154
5.2.1	降雨不均性指标确定	154
5.2.2	流域次降雨量空间分布不均匀性研究	155
5.2.3	流域次降雨雨强空间分布不均匀性研究	156
5.2.4	流域暴雨中心发生的随机性研究	157
5.3	流域降雨空间变化的特征分析	158
5.3.1	不同类型降雨的点面关系分析	158
5.3.2	降雨站点的空间相关性	161
第6章	流域土地利用/森林植被变化下的水沙运移尺度效应	164
6.1	罗玉沟流域土地利用/森林植被变化下的水沙运移规律	167
6.1.1	年径流、输沙规律	167
6.1.2	月径流、输沙规律	171
6.1.3	洪水径流、输沙规律	174
6.2	吕二沟流域土地利用/森林植被变化下的水沙运移规律	176
6.2.1	年径流、输沙规律	176
6.2.2	月径流、输沙规律	179
6.2.3	洪水径流和输沙规律分析	182

6.3	桥子沟流域土地利用/森林植被变化下的水沙运移规律	184
6.3.1	径流、输沙年变化	184
6.3.2	径流、输沙年内变化	188
6.3.3	土地利用/土地覆被变化对洪水径流的影响	191
6.4	土地利用/森林植被变化下流域水沙运移的尺度分异规律研究	195
6.4.1	流域土地利用/森林植被变化下的理水减沙尺度效应研究	195
6.4.2	流域森林植被变化对理水减沙的响应分析	202
第7章	流域土地利用/森林植被变化下洪水径流及输沙过程随尺度变化规律	204
7.1	流域洪水径流和输沙对降雨及其时空分布的尺度响应研究	204
7.1.1	暴雨综合类型的降雨特征值与洪水径流、输沙关系分析	205
7.1.2	A型暴雨下降雨特征值与洪水径流、输沙关系分析	208
7.1.3	B型暴雨下降雨特征值与洪水径流、输沙关系分析	211
7.1.4	C型暴雨下降雨特征值与洪水径流、输沙关系分析	214
7.2	流域洪水径流和输沙过程的尺度效应研究	216
7.2.1	流域洪水径流及其变率对输沙的影响	216
7.2.2	流域洪水侵蚀产沙过程随尺度变化规律研究	224
7.3	流域洪水含沙量的尺度分异及洪水稳定含沙量规律研究	232
7.3.1	流域洪水流量与含沙量的尺度分异规律研究	232
7.3.2	流域洪水衰退时的稳定含沙量分析	237
第8章	基于 WEPP 模型的多尺度流域径流和侵蚀产沙模拟	241
8.1	WEPP 模型的结构与参数率定	241
8.1.1	WEPP 模型的结构	241
8.1.2	GeoWEPP 参数率定及数据输入	243
8.2	WEPP 模型在研究区的适用性检验及输入参数校正	248
8.2.1	CLIGEN 生成气候数据的精度分析	249
8.2.2	WEPP 模型基于土壤侵蚀机理的坡面侵蚀方程解析验证	253
8.2.3	土壤、植被生长输入参数的校准和验证	255
8.3	GeoWEPP 模型对流域径流和侵蚀产沙的模拟校准与检验	257
8.3.1	模型适用性的评价指标	258
8.3.2	模型参数校准和检验	258
8.4	基于 GeoWEPP 模型的典型流域单元划分及径流与产沙模拟	265
8.4.1	GeoWEPP 模型对流域径流和输沙模拟的运行过程	265
8.4.2	GeoWEPP 模型对典型流域单元的提取	269
8.4.3	GeoWEPP 模型对典型流域单元径流和输沙的模拟	270
8.4.4	典型流域单元径流和泥沙来源分析	276
8.5	基于 GeoWEPP 模型的典型流域单元水文生态响应情景分析	279
8.5.1	不同降水水平年典型流域单元侵蚀产沙对比分析	280
8.5.2	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	281
8.5.3	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	284

第 9 章 土地利用/森林植被变化下的流域地形特征与侵蚀产沙耦合关系	285
9.1 典型流域单元地貌形态分形维数计算	285
9.1.1 分形理论概述	285
9.1.2 地形地貌分维的地学意义	287
9.1.3 流域地貌形态特征分形维数的 GIS 模型测定方法	289
9.1.4 典型流域单元地貌形态特征分形维数计算与分析	291
9.2 流域地貌信息维数与侵蚀产沙的耦合关系	294
9.2.1 典型流域单元径流深与输沙模数关系	294
9.2.2 典型流域单元地形分维与年输沙模数关系	295
9.2.3 典型流域单元地形分维与年径流输沙的耦合关系	297
9.3 流域泥沙输移的分形特征及尺度转换	302
9.3.1 流域泥沙输移比的时空分异	303
9.3.2 流域泥沙输移比的影响因子分析	305
9.3.3 流域泥沙输移比的分形特征	310
9.3.4 流域泥沙输移比的尺度转换研究	311
9.4 森林植被/土地利用变化下的流域径流和输沙尺度转换	314
9.4.1 典型流域单元森林植被/土地利用变化特征值提取	314
9.4.2 森林植被/土地利用变化下的流域径流和输沙尺度转换	319
第 10 章 基于 SWAT 模型的无定河流域 LUCC 的水文生态响应	323
10.1 无定河流域土地利用/森林植被格局演变及驱动力分析	323
10.1.1 土地利用类型图的生成	323
10.1.2 流域土地利用/森林植被动态变化	324
10.1.3 驱动力分析	328
10.2 SWAT 模型及数据库的构建	329
10.2.1 SWAT 模型基础数据库构建	330
10.2.2 SWAT 模型敏感性分析及校准验证	341
10.2.3 模型参数的校准与验证	342
10.3 流域森林植被格局对径流、侵蚀产沙的影响	344
10.3.1 流域降水、径流和产沙的动态变化	344
10.3.2 流域森林植被格局演变影响下的侵蚀产沙模拟	349
10.3.3 流域不同森林植被格局下的侵蚀产沙预测	357
10.4 水土保持生态建设措施的减水减沙效益分析	362
10.4.1 无定河流域降雨径流、产沙模型	362
10.4.2 无定河流域产流、产沙计算和变化原因分析	365
10.4.3 无定河流域水土保持生态建设措施减水减沙效益分析	368
参考文献	374

第1章 绪 论

1.1 流域土壤侵蚀（水文生态）过程与机制

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。土壤侵蚀过程是地球这个复杂系统水文生态过程中的一部分，土壤侵蚀中的泥沙运移紧紧伴随着水文循环过程，而生态过程又深刻影响着水文过程及泥沙输移过程。地球表层系统中生态过程和水文过程相互耦合即为水文生态过程，它是地球表层系统发展和演化的基本过程。20世纪70年代以来，世界人口快速增长，全球变化背景下的土地利用/土地覆被变化对局地、区域以及全球气候都产生了广泛而深刻的影响。世界范围内，由于土地覆盖变化而引起的土壤损失和退化以及沉积物运移无疑已经极大地增加了(Janauer, 2000)。同时，全球性的淡水资源危机日益凸显，而且愈演愈烈。旱涝灾害频繁，水污染问题突出，水土流失现象严重，使本就脆弱的生态、环境不断恶化。而传统的基于“需求管理”的水资源管理模式和基于水文机制的工程措施以及末端污染物的被动处理、简单的植树种草以及降低坡度等措施已经不能应对当前全球性的淡水资源危机，都无法解决这一难题。在此背景下，全球水文循环中的生态作用成为核心问题之一，使得水文过程与生态过程耦合研究成为水文科学最为活跃的领域(Covich, 1993; 刘昌明, 1999)，而土壤侵蚀过程的研究同样离不开水文过程和生态过程的耦合研究。

20世纪90年代，正式提出的水文生态学这一交叉学科就是以水文生态过程为基本研究内容，通过对地表不同时空尺度的水文生态特征和水文生态过程的探讨，寻求和建立地球表层系统可持续的水文生态模式，实现水资源和水环境的可持续管理(严登华, 2001; Zalewski, 1997)。流域是水文响应的基本单元，也是水文水资源研究的基本单元，因而成为水文生态过程研究最理想的空间尺度。流域水文生态过程研究就是将流域水文和流域生物区系(尤其是植被)在流域空间上加以整合，形成超有机体(Super-organism)，揭示这一超有机体在自然和人类驱动下的形成和演化过程(Zalewski, 2000)，从而将流域的生态学属性、水文学特征、自然和人类活动对流域生态系统的干扰等有机地结合在一起。流域水文生态物理过程、化学过程及其生态效应研究、水文生态模拟研究和模型开发以及十年至百年尺度的(自然和人为驱动的)变化环境下的地球表层系统水文生态格局及其演变历史、水文生态过程和未来演变态势均是当前水文生态学最为关注的内容(UNESCO, 1996)。水文生态过程形成、演化及驱动机制分析、流域水文生态格局与水生态空间耦合演化分析、水文生态恢复以及流域尺度的水文生态过程集成与模拟等方面的研究将是未来流域水文生态过程研究的热点和重点(宋长青、冷疏影, 2005; 王根绪等, 2005; 黄奕龙等, 2003; 邓伟等, 2004)。

1.1.1 流域土壤侵蚀过程研究

不同时空尺度上和一系列环境条件下的生态水文过程研究是生态水文学的一个重要研究方向,也是 MAB 和 IHP 等研究计划的主要内容之一 (Janauer, 2000)。生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系 (IHP, 1998),它是揭示生态格局和生态过程变化水文机理的关键。从生态水文过程对物质的运移和转化作用着手,研究其发生发展规律,调整人类活动,与自然为善,对流域的生态水文过程进行合理修复和改进,以使水环境系统沿着持续发展途径演化 (夏佰成等, 2004)。因此,研究生态水文过程可以为构建合理生态水文格局和持续利用水资源提供理论支持 (王根绪等, 2005),生态水文过程的剖析与调节被认为是实现水资源可持续发展的关键所在。

生态水文过程 and 传统水文过程最大的区别在于它吸收了许多生态学理论,特别是生态系统方法论。生态水文过程研究更重视不同的生物 (特别是植被) 与水文过程之间相互影响、耦合关系的探讨。水文过程生态系统的稳定性、水文过程生态系统协调机制之间的关系组成了基本的生态水文关系,通过这种关系的研究可以为生态水文布局及其动态平衡的维持提供理论依据,为生态演替和水文循环变化及其相互关系提供合理的解释和有效的预测。传统水文学中的尺度概念十分淡漠,在模拟水文过程时,一般不考虑尺度效应及不同尺度间的联系和转换,而时空尺度在生态水文过程研究中随处可见 (黄奕龙等, 2003)。

从水分行为的角度来说,生态水文过程研究包括生态水文物理过程、生态水文化学过程及其生态效应 (黄奕龙等, 2003)。生态水文物理过程主要是指土地利用和植被覆盖对降雨、径流、蒸发等水分要素的影响;生态水文化学过程是指水质性研究;而水分生态效应主要指水分行为对植被生长和分布的影响。

1.1.1.1 水文生态物理过程

(1) 土地利用变化的水文生态过程响应

土地利用/覆被变化 (LUCC) 是陆地生态系统变化的主要表现,近年来生态水文过程研究的一个重要方面就是围绕 LUCC。土地利用变化的重要环境反应是以水文行为变化出现的,如径流的组成、侵蚀速率或地下水补给速率的变化,而水文行为变化又会影响环境反应并反作用于土地利用,由此交织形成一个复杂并相互作用的系统 (Schulze, 2000)。土地利用导致土地覆被变化,变化的土地覆被状况与近地表面的蒸散发、截留、填洼、下渗等水文要素及其产汇流过程密切相关。目前,土地利用强度与水资源利用率的关系 (Bernt, *et al.*, 2000; 史培军等, 2000; 傅伯杰等, 2001; Schlesinger *et al.*, 1990)、土地利用变化而引起的沉积物运移的规律 (史培军等, 2000; Bormann *et al.*, 1999) 以及土地利用格局与水文过程的响应关系 (傅伯杰等, 1999a; 夏军、谈戈, 2002; Doerra *et al.*, 2006; Sandra and Ming-ko, 2003), 都是研究的热点。

土地利用强度的加大增加了水资源的利用率,增加了地表水的排泄速度,地下水的过度开发利用导致其水位下降,形成大面积的降落漏斗 (Bernt *et al.*, 2000),并且在部分城市已经出现了严重的地表沉降和海水入侵现象。肖洪浪 (2004) 依据黑河流域

水-生态-经济系统的流域生态水文过程研究,得出合理的景观结构布局可以使涵养水源、绿洲尺度的水利用率提高,若与专家和管理层结合可进一步提高流域水资源利用率。

世界范围内,由于土地利用变化而引起的沉积物运移已经大大地增长了(邓伟,2004;傅伯杰,1999a)。由于人类耕作和定居引起的土地覆被的变化已造成了世界性的水污染(赵米金,2005)。当前由于土地利用/土地覆被变化而通过非点源途径引起的水体污染,受到了全球性的关注。非点源污染是同点源相对应的,指溶解的或固体污染物从非特定的地点在降水和径流冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体引起的水体污染。几乎所有的非点源污染来源都与土地利用/土地覆被变化紧密联系。其中,土壤侵蚀是规模最大、危害程度最为严重的一种非点源污染。

土地利用类型的多样性和利用结构的复杂性,及土地利用格局与水文过程的关系一直是一个重要的研究课题。Bronstert等(Bronstert *et al.*, 2002; Klocking and Haberlandt, 2002; Naef *et al.*, 2002; De Roo *et al.*, 2003)总结了可能影响地面及近地表水文过程的土地利用变化及与之相关的水文循环要素,其中影响水文过程最显著的土地利用变化是植被变化(如作物收割、森林砍伐)、农作物耕种和管理实践、城镇下水道及排污系统等。国内外学者(Bormann *et al.*, 1999; 傅伯杰, 1999a; Richey, 1985)有关LUCC对流域产流量的影响进行了深入的研究,认为森林的开采(特别是高地上的森林)增加了下游洪水泛滥的频率和强度,一般会减少每年的径流量,并使得降水的再分配不平均;草地的变化有类似的效果。和农耕地相比,休闲地在地下水的补给中贡献很大,但同时它也增大了地表产流量和河道排泄。傅伯杰等(1999)在对黄土高原的研究中表明,坡耕地-草地-林地格局(由坡面下部至上部顺序)对减少水土流失最为有利。在坡耕地-草地-林地格局中,林草地的高入渗率和有效的植被覆盖减少了地表径流的产生和沉积物的运移,具有较好的保持养分和水分的作用,因此对水土保持最为有利。在黄土高原的生态建设中,特别是植被建设的水环境效应研究中,土壤干层(李玉山, 1983; 李玉山, 2001)现象最早引起人们的注意。它是黄土高原植被增加后,随降雨-入渗-蒸腾-径流关系的变化而出现的土壤干燥化趋势(杨文治, 1994)。土壤干燥化现象被认为是一种普遍存在的现象,是当前黄土高原土地利用结构调整和植被建设中普遍关心的热点问题之一。土地利用结构变化不仅引起了土壤的干燥化,同时还引起了水文生态过程的变化。国外对土地利用结构调整对水文过程的影响进行了大量的研究,其共同特点是强调了流域植被类型和土地利用结构与水文要素间的关系(刘文兆, 2000),国内也开展了类似的研究(黄明斌等, 1999),其基本结论是流域产水量随植被覆被的减少而增大(王礼先, 1998)。

(2) 植被对流域水文机理的影响

水文学家早就关注生态系统对水分的消耗以及植被系统蒸散发作用对水文循环过程的影响,如森林和草地植被如何影响流域产汇流以及区域生态系统碳排放如何与水分结合影响区域降水过程等问题(刘世荣, 2000; Hornbeck *et al.*, 1993)。植被覆盖能够有效地影响地表反射率、地表温度、下垫面的粗糙度和土壤-植被-大气连续体间的水分交换,在多个层次上影响降雨、蒸发和径流,从而对水资源进行重新分配,并由此影响水文循环全过程,而人类活动和气候变化放大了植被的生态水文效应(Winter, 2001)。

1) 森林植被层对降水的影响及分配作用

由于林区气温降低、地表粗糙度较高,增加了拦截、液化水平汽流(如云、雾和霜等)的能力,因此森林的降水量比值要高于灌丛和草地。已有的小区研究,如: Hursh 在美国田纳西州、我国 1951~1999 年林区和非林区的降雨量和植被覆盖间关系的研究均表明,林区能在一定程度上增加降雨,并且增加的主要是水平降雨(闵庆文、袁嘉祖, 2001; 葛全胜等, 2001; 雒文生, 1989)。但在大尺度上,大面积自然植被的破坏,特别是热带雨林的破坏可能造成降雨量的减少,并改变整个区域的水文循环模式(Richey, 1989; Bromley *et al.*, 1997; Dickenson, 1991)。科学家在亚马孙河流域做了大量的工作,预测表明,流域的森林全部被砍光后,当地的降雨量将大幅度减小,并改变降雨过程的分配模式(Lean, 1989; Skukla, 1990)。当今,全球变暖、气候变干是一个不争的事实,人们更加重视植被对降雨量的影响,并将其研究和全球植被覆盖率降低、土地利用强度加大联系起来。

林冠在降雨到达地面以前改变了其空间分布,降雨中某一成分永远到不了地面,这部分水被叶、枝和茎拦截并以“湿冠层蒸发”或“截留损失”的过程蒸发掉(王佑民, 2000a; Nick, 2001)。森林林冠截留的大部分雨量由蒸发返回大气,通过林冠后到达地表的雨量减少,时间上也要滞后。国外的研究结果表明,林冠截留率一般在 10%~30% (Teng-ChiuLin, 1997; Delphis, 2003)。但也有研究表明:温带针叶林林冠截留率一般在 20%~40% (Hornbeck *et al.*, 1992; Mc Culloch and Robinson, 1993; Stednick, 1996; SWank *et al.*, 1988)。国内的研究表明:林冠一般可以截留全年降雨的 15%~30%,全年林冠截留率一般在 20%左右,热带雨林和川西高山原始林可达 30%以上(闵庆文, 2001)。目前已有的林冠截留模型中, Rutter 模型和 Gash 解析模型是较为完善和应用广泛的两个林冠截留模型。Valente 等对这两个模型进行了修正并较好地模拟了稀疏林冠的降雨截留过程。此外, Whelan 和 Anderson 将林冠截留的空间变化参数整合到一个简单的 Rutter 模型中,对坡面尺度上挪威云杉人工林穿透降雨和林冠截留损失空间格局进行了较好的模拟(张志强等, 2003)。

森林枯落物层作为森林系统中独特的结构层次,不仅对森林土壤发育和改良有重要意义,而且枯落物层的结构疏松,具有良好的透水性和持水能力,在降水过程中起着缓冲器的作用。一方面,枯落物层能削弱雨滴对土壤的直接溅击;另一方面吸收一部分降水,减少到达土壤表面的降水量,同时由于枯落物层的机械拦截作用,可以大大减少地表径流的产生,起到保持水土和涵养水源的作用。来自四川冷杉林的研究表明,降雨量小于 5mm 时,枯落物几乎可以吸收这部分雨量(王礼先, 1997)。枯落物及林地良好的结构增加水分的渗透和蓄积,同时使地表径流减弱和径流时间滞后。林地土壤入渗率可以达到草地 2~4 倍,其土壤的保水能力也比灌木、草地和裸地高。周晓峰的研究表明,将藓类-杉木林转变为灌木林后, 0~80cm 土壤蓄水能力降低了 42.13%, 0~20cm 降低了 66.1% (周晓峰, 2001)。

2) 森林植被对蒸散发的空间分配的影响

森林植被在垂直方向上对蒸散有明显的空间分异作用。国外的资料表明:树木蒸腾量占总蒸散量的比例从干季到湿季也有其变化范围 43%~68% (Kell and Wilson, 2001; Thomas *et al.*, 2003)。林内地表蒸发仅占测定的总蒸散量与植物蒸腾量之差的

小部分 (Kell and Wilson, 2001)。国内的资料表明: 林冠层蒸散量在总蒸散量中占优势。高人 (2002) 在对辽宁东部山区 5 种主要森林类型的研究表明, 各林分类型生长季总蒸散量为 476.6~651.3mm, 以林冠的蒸发散为主, 占同期总蒸散量的 73.5%~88.6%, 林冠下林地蒸发散为 69.31~26.5mm, 占总蒸发散量的 11.4%~26.5%。此外, 蒸散量随森林植被的水平变化而分异。联邦德国鲍姆加特纳综合了大量关于森林蒸散的研究成果, 与其他地类进行比较, 得出森林蒸散通常比低矮植被蒸散量大 10%~30%, 几乎与水面蒸发一样 (熊峰等, 2005)。国内的研究也认为林地的蒸散量总体大于无林地 (熊峰等, 2005)。程根伟 (2003) 等在中国科学院贡嘎山高山生态站计算对比分析非森林地面蒸发和森林蒸散的结果发现, 在非生长季节, 林地蒸散大约比非森林地面低 25%; 而在生长季节, 森林蒸散比非林地高 25% 左右。总体来说, 森林植被能增加蒸散量。

3) 森林植被对径流分配的影响

通过对森林植被与土壤入渗能力相关关系研究, 发现森林植被能增加土壤入渗, 从而减少地表径流的形成。这主要是因为森林植被能减小土壤容重, 增大土壤孔隙度和贮水量 (余新晓等, 2003)。而土壤容重小, 孔隙度大, 初始含水量低, 都能增大土壤入渗率 (陈丽华等, 1995; 张永涛, 2002)。余新晓 (2003)、陈丽华 (1995)、张永涛 (2002)、潘紫文 (2002) 分别对我国不同类型的森林土壤入渗能力进行了测定, 得到了一致的结论, 森林土壤的水分入渗能力明显大于非林地。林地与对照的荒地相比, 入渗率平均值是荒地的 3~4 倍 (张永涛, 2002; 潘紫文, 2002)。

森林植被对壤中流的形成有直接的影响: ①植物根系的吸水作用影响壤中流的形成。由于植物根系分布引起土体内水分消耗的非均一性, 远离植物根际区土壤水分在根系密集区土壤水势梯度的作用下, 向根际区汇集, 从而对壤中流的形成产生影响 (秦耀东, 2000)。②植物死亡根系对管流的形成是一种直接贡献。管流作为优先流中的一种主要的大孔隙流 (张洪江, 2003), 对土壤水分的入渗及壤中流的形成具有重要的作用。由植物死亡根系形成的生物性土管由于其内壁的粗糙程度较地质性土管 (由土壤裂隙形成的土管) 大, 因此对水分的传输更为迅速 (杨新华, 2001)。

森林植被对地下径流的影响有两个相反的作用: 一方面增加土壤入渗有利于水分补充到地下水中; 另一方面植物的蒸腾作用吸收大量土壤水分以及对土壤贮水力的改善又不利于水分对地下水的补充。国内的研究表明: 森林植被能在降水充沛的季节增加入渗, 从而有利于增加地下水的补充量, 形成地下径流 (杨新华, 2001; 吴绳聚, 1994; 尹佃忠, 2003); 但在干旱半干旱的黄土地区, 密度过大的森林植被强烈蒸散引起的土壤干层, 因其巨大水分亏缺量而阻隔重力水下渗, 阻止降水垂直入渗补给地下水的的作用, 又不利于地下径流的形成 (李玉山, 2001; 刘贤赵、黄明斌, 2003)。

关于森林植被对流域总径流量的影响, 国内外还没有一致的结论 (石培礼、李文华, 2001)。一种观点认为, 在集水区尺度上, 国内外的研究均表明: 植被覆盖增加, 径流和养分流减少; 并且在原无植被覆盖的地区种植植被将会减少地表径流量 (周晓峰, 2001)。Stednick (1996) 和 Grant 在美国较大流域上的研究也验证了以上结论 (Ziemer and Lisle, 1998)。N. Fohrer (2001) 在 Dietzh lze 流域的研究还表明, 和壤中流、溪流相比, 地表径流对植物覆盖参数最为敏感; Kleidon (2000) 在 Amazon. S.

Hagemann (1999) 在南非 Sambesi 集水区的研究表明, 随着地下生物量的增加, 径流量、产沙量和养分流失减少。Jayasuriya (1993) 在澳大利亚对桉树砍伐方式的研究表明, 斑块状的皆伐方式比间伐对径流量的贡献更大。Hornbeck (1993) 在美国西南部研究表明, 植被皆伐后, 不同地理单元降雨量的高低通过影响植被恢复速度也影响水量的变化, 长时间来说, 干旱区的影响将更为持久; 而皆伐后, 自然恢复比人工恢复能更快地降低产流量。另一种观点认为, 植被减少, 径流减少。来自埃塞俄比亚北部、坦桑尼亚 Kondoa 和我国长江上游的研究都得出上述的结论 (周晓峰, 2001; Cheng, 1999; Ruprecht and Stoneman, 1993), 而 Wright (Ziemer and Lisle, 1998) 的研究表明了植被覆盖和径流没有明显的比例关系。Braud (2001) 在 Andes 研究了植被对径流的影响, 通过两个集水小区 1983~1994 年的研究表明地质条件相同时, 径流对植被覆盖不敏感。前苏联西北部 and 上伏尔加流域等集水区以及我国在海南等地的集水区研究也表明, 小流域年径流量和植被覆盖率没有明显的比例关系 (周晓峰, 2001)。因此, 不同的自然条件和尺度下, 植被对径流的影响不尽相同, 降雨量、土壤前期湿润状况、地理条件和森林覆盖率、植被群落结构都有可能占优势, 并由此而导致径流的时空格局与过程上的差异, 某一自然条件和不同尺度上得出的结论不能简单地外推 (Sandstrom, 1998)。

1.1.1.2 水文生态化学过程

生态水文化学过程不同于生态过程中的化学过程, 它主要是指水文行为的化学方面, 也即水质性研究。人类耕作 (特别是化肥和杀虫剂的使用) 造成的点源、非点源污染和定居 (城市污水) 引起的生态水文变化已造成了世界性的水污染 (史培军, 2000; Terpstra and Van, 2001)。水文过程可以通过多种水文要素, 如水位、水力影响营养物质在淡水生态系统内的分布与富集 (Dakova *et al.*, 2000; Dubnyak and Timchenko, 2000)。淡水生态系统周围的湿地、洪泛平原可以通过影响河流水流格局和地下水的补给、径流和排泄, 在控制和降低营养物的沉积、运移、营养负荷, 净化水质 (特别是降低水质硬度) 方面具有重要的作用。由于淡水生态系统周围湿地斑块分布上的差异性, 因此营养物呈现不同的分布和富集程度 (Brinkmann *et al.*, 2000)。

生态水文化学过程研究目标是定量生物因素、非生物因素之间的联系以及它们在水中的沉积物质、营养物质和污染物质运输、转化中的作用, 以确定从区域到流域尺度上的转移路径。生态水文化学过程研究已被列入 IGBP 未来研究热点问题之一 (刘清春、千怀遂, 2005)。

1.1.1.3 流域水文过程的生态效应

水文过程控制了许多基本生态学格局和生态过程 (Rodriguez-Iturbe, 2000), 特别是控制了基本的植被分布格局 (Garcia and Merion, 2000), 是生态系统演替的主要驱动力之一。利用调整水文过程的方法可以很好地控制植被动态, 例如: 水文过程可以调整和配置景观内的“流” (包括营养物、污染物、矿物质、有机质); 水质的恶化和水位 (特别是地下水浅水位) 变化, 水化学特征及其变化, 影响植物的群落结构、动态、分布和演替 (Garcia and Merino, 2000)。可以利用水的流量、流速、质量等水文要素对