

【水土保持与荒漠化防治系列专著】



黄土高原

多尺度流域环境演变下的水文生态响应

余新晓 张满良 信忠保 张学霞 等/著



科学出版社

水土保持与荒漠化防治系列专著

黄土高原多尺度流域环境 演变下的水文生态响应

余新晓 张满良 信忠保 张学霞 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以黄土高原多尺度耦合流域为研究对象,采用动力水文过程测定技术、景观生态学测度方法以及成熟的水文观测方法,结合多年水文气象观测资料,介绍了不同尺度流域土地利用/覆被变化过程和气候要素及水文要素的变化现状,分析了流域环境演变对水文生态的影响,并应用分布式水文模型 SWAT 模型和 TOPOG 模型进行了不同尺度流域水文生态过程模拟,分析了在未来变化环境下黄土高原不同尺度流域的生态水文响应过程,并在此基础上揭示了土地利用/覆被对水文功能的影响与调节机制,解析多尺度流域耦合的水文生态对土地利用变化的响应机制,为黄土高原区水资源的保护、开发和合理利用以及生态环境建设工程提供重要理论依据。

本书可供水土保持学、林学、生态学、水文学、环境科学、地理学等专业的研究、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

黄土高原多尺度流域环境演变下的水文生态响应 / 余新晓等著. —北京:科学出版社, 2011

(水土保持与荒漠化防治系列专著)

ISBN 978-7-03-032511-2

I. ①黄… II. ①余… III. ①黄土高原-流域-生态环境-关系-环境水文学-研究 IV. ①X171.1②X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 205223 号

责任编辑:朱 丽 孙 青 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 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>

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

*

2011 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 10 月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—1 200 字数:489 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

国家自然科学基金(40871136)——

黄土高原多尺度耦合流域土地利用/覆被对水循环的影响及水文生态响应研究资助研究

参加编写人员名单(按姓氏拼音排序):

陈 欣 陈丽华 陈鹏飞 李海光 李建牢 李庆云 刘 晓 刘淑燕
宋思铭 王友生 信忠保 余新晓 张海强 张琳玲 张满良 张学霞

丛 书 序

水土流失与荒漠化直接关系到国家生态安全。严重的水土流失与荒漠化是生态恶化的集中反映,已成为我国生态环境最突出的问题之一。水土流失与荒漠化不仅导致土地退化、毁坏耕地,制约山区社会经济发展,使人们失去赖以生存的基础,而且加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,加剧贫困,威胁国家粮食安全和生态安全;这不仅影响当代社会的发展,而且影响子孙后代的生存。因此,加强水土保持与荒漠化防治基础理论研究,找出科学合理的防治方法与措施,开展生态环境建设、资源与社会可持续发展的理论研究与实践,已成为关系国家生态安全和社会可持续发展的当务之急。

《水土保持与荒漠化防治系列专著》是在北京林业大学“985”优势学科创新平台“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”和“211”工程(三期)的资助下编写出版的,分册相对独立,以水土保持与荒漠化防治基础理论与水土流失和荒漠化综合防治实践为基础,从不同角度、综合反映了研究团队新的科研成果。该系列专著以土壤侵蚀动力学过程及其机制、生态水文过程与调控、植被力学过程与调控、土壤风蚀过程与防控、水土流失区林草植被快速恢复与生态修复关键技术、开发与建设城市化损毁土地生态系统快速恢复与重建技术等为主要研究内容,系统反映了在长期水土保持荒漠化防治实践中积累的丰富防治经验,有针对性地提出了我国水土保持荒漠化防治生态建设面临的主要问题的防治对策,为今后进一步加强水土保持荒漠化防治研究奠定了坚实的基础。

该系列著作的内容均为水土保持与荒漠化防治研究领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,在理论框架、新方法和新技术方面做了很多开创性的工作,在推动水土流失与荒漠化防治综合防治关键技术研究方面进行了有益的探索,对我国进行水土保持与荒漠化防治综合管理研究起到了积极的推动作用。

该系列著作不仅为地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作提供有益的参考,也是我国水土保持与荒漠化防治生态建设相关技术人员、行政管理人员的一套好的参考书。该系列著作的出版,无疑将对我国水土保持与荒漠化防治生态建设的深入开展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

李文华

2011年5月

前 言

20 世纪后半期以来,在世界人口剧增和经济高速发展的过程中,人类赖以生存的生态环境发生了巨大的变化,全球和区域性的生态环境问题不断加剧,如全球变暖、水资源短缺、水环境污染、土地退化与沙漠化等全球规模的环境问题越来越严重,所有这些变化均对当前人类经济可持续发展构成极大的威胁。我国水资源供需矛盾已严重制约经济社会的发展,环境演变将加剧水文循环的过程,驱动降水量、蒸发量等水文要素的变化,增大水文极端事件发生的概率,改变区域水量平衡,影响区域水资源的分布,因此,分析区域环境演变对水文水资源的影响具有十分重要的意义。

中国黄土高原位于我国内陆腹地,地处黄河中上游和海河上游地区,由于人类活动和不合理的开发导致环境恶化、气候干旱、植被破坏、黄土裸露、灾害频繁、土地贫瘠化等问题日益突出。近 50 年来,黄土高原地区气候暖干化发展趋势明显,同时以大规模退耕还林还草为主的生态环境建设和以修建水平梯田、坝地为主的基本农田建设正在从根本上改变黄土高原许多流域的下垫面条件,特别是土地利用的时空分布特征,进而导致其水文生态过程发生变化。因此,有必要以黄土高原多尺度流域为研究对象,分析黄土高原地区人类活动与环境演变的关系,找出土地利用/覆被景观格局演变规律及其驱动力,研究降水、蒸散的多尺度分布规律和降雨径流形成、运行机理,揭示土地利用/覆被空间分异规律及其对水文功能的影响与调节机制,解析多尺度耦合流域的水文生态对环境演变的响应机制,以辨析基于水量平衡的流域水分循环、转化过程,为我国黄土高原区土地利用规划和管理、水资源保护和高效利用以及生态系统稳定维持等方面提供基础理论依据。

本书的编写主要基于作者主持的国家自然科学基金项目“黄土高原多尺度耦合流域土地利用/覆被对水循环的影响及水文生态响应研究”的研究成果。全书共分 7 章。第 1 章绪论,主要介绍环境演变下水文水资源的研究现状,并指出研究区域概况与研究方法;第 2 章分析了研究区不同尺度流域土地利用/覆被变化过程;第 3 章、第 4 章介绍环境变化背景下不同尺度流域气候要素、水文要素的变化现状;并分析了不同尺度流域环境演变对水文生态的影响;第 5 章、第 6 章基于分布式水文模型 SWAT 分析了不同尺度流域水文生态变化情况,并根据假定的气候情景和土地利用变化情景以及未来可能的环境演变情景,分析评价了不同尺度流域水文水资源对变化环境的敏感性及脆弱性;第 7 章基于 TOPOG 模型小流域生态水文过程的模拟,分析了在未来变化环境下吕二沟流域的生态水文响应过程。

全书由北京林业大学水土保持学院余新晓教授设计并统稿。在本书写作过程中,余新晓教授和其课题组成员通力合作,从野外调查到数据整理,进行了大量的资料分析工作。考虑到全书的系统性,书中参阅了大量的参考文献,借此机会向这些文献的作者表示衷心感谢!科学出版社对本书的出版给予了大力支持,编辑为此付出了辛勤的劳动,在此表示诚挚的感谢!

环境演变过程是一个长期的、全球性的问题,更是一个跨学科的极其复杂的科学问题。在这种变化环境下评价黄土高原不同尺度的水文水资源效应对当地经济社会可持续发展有非常重要的指导作用,但该领域的许多科学技术问题仍是较长时期内研究的热点和难点,需要进一步深入研究。限于作者知识水平、能力有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝赐教!

余新晓

2011年6月于北京

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 环境演变下的水文生态响应	1
1.1.1 土地利用/覆被变化的水文生态过程响应	2
1.1.2 气候变化的水文生态响应	6
1.1.3 气候和土地利用/覆被变化的生态水文响应研究方法	9
1.1.4 存在的问题及发展方向	13
1.2 研究区概况.....	14
1.2.1 研究区域自然环境概况	14
1.2.2 研究流域概况	15
1.3 研究方法与技术路线.....	23
1.3.1 基础数据收集	23
1.3.2 水文气象变化趋势性诊断方法	32
1.3.3 模型模拟方法	33
第 2 章 流域土地利用/覆被变化过程分析	49
2.1 流域土地利用类型变化分析.....	49
2.1.1 不同时期土地利用类型的构成	49
2.1.2 流域土地利用类型变化过程	57
2.2 流域土地利用/覆被景观格局研究	75
2.2.1 流域景观特征指数的选择与确定	75
2.2.2 流域土地利用景观动态变化	78
2.3 流域未来土地利用变化预测.....	83
2.3.1 预测方法.....	83
2.3.2 预测结果.....	85
第 3 章 流域气候要素变化分析	91
3.1 安家沟小流域降水动态变化分析.....	91
3.1.1 降水的年际动态	93
3.1.2 降水的丰枯年分析	93
3.1.3 降水的年内分析	94
3.1.4 小流域降水特性分析	95
3.2 吕二沟小流域降水变化特征及趋势性检验.....	97
3.2.1 降水的时间异质性	97

3.2.2	降水的空间异质性	98
3.3	罗玉沟流域降水变化及趋势性检验	103
3.3.1	降水的年际变化	103
3.3.2	年际降水变化的趋势检验	105
3.3.3	降水的年内分配特征	106
3.4	藉河流域降水变化及趋势性检验	107
3.4.1	降水的年际变化	107
3.4.2	年际降水变化的趋势检验	109
3.4.3	降水的年内分配特征	111
3.5	流域气温变化特征及趋势性检验	112
3.5.1	气温的年际变化	112
3.5.2	气温的变化趋势检验	114
3.5.3	气温的年内变化	116
3.6	流域潜在蒸散发的变化规律及趋势性检验	118
3.6.1	吕二沟流域	118
3.6.2	罗玉沟流域	123
第4章	环境演变对流域水文生态的影响分析	129
4.1	径流、泥沙变化分析	129
4.1.1	吕二沟小流域径流输沙变化过程分析	129
4.1.2	罗玉沟流域径流量-输沙量关系分析	139
4.1.3	藉河流域径流量-输沙量关系分析	151
4.2	实际蒸散发的变化分析	160
4.2.1	实际蒸散发的计算方法	160
4.2.2	实际蒸散发的年际变化以及趋势性变化	161
4.2.3	实际蒸散发的流域水量平衡法验证	162
4.2.4	实际蒸散量、潜在蒸散量与气象因子之间的关系	164
4.3	水文生态对土地利用和气候变化的响应	165
4.3.1	吕二沟小流域	165
4.3.2	罗玉沟流域	175
4.3.3	藉河流域	181
第5章	基于分布式水文模型 SWAT 的水文生态分析	196
5.1	藉河流域的水文生态分析	196
5.1.1	SWAT 数据库的建立	196
5.1.2	基于 DEM 的水文参数提取	200
5.1.3	模型参数的敏感性分析	206
5.1.4	流域径流输沙模拟的参数率定与验证	209
5.1.5	流域径流泥沙模拟与验证的结果分析	212
5.1.6	模型的不确定性分析	221

5.2 罗玉沟流域的水文生态分析	227
5.2.1 SWAT 模型数据库的建立	227
5.2.2 子流域的划分以及水文响应单元	228
5.2.3 参数的敏感性分析	230
5.2.4 模型参数的校准与率定	231
5.2.5 径流模拟与验证的结果分析	233
5.2.6 泥沙模拟与验证的结果分析	235
5.2.7 蒸散模拟与验证的结果分析	238
5.2.8 水质模拟与验证的结果分析	241
5.2.9 模型中特殊土地利用类型梯田参数的率定	242
5.2.10 模型中土地利用类型-林地参数的率定	245
5.2.11 模型的不确定性分析	246
5.3 安家沟小流域	252
5.3.1 研究流域基础数据库的构建及运行	252
5.3.2 安家沟流域 SWAT 模型参数率定及敏感性分析	265
第 6 章 基于 SWAT 模型的未来环境演变下的水文生态响应模拟	274
6.1 土地利用/覆被变化对水文生态的影响模拟	274
6.1.1 土地利用情景变化的构建	274
6.1.2 不同土地利用/覆被变化的模拟结果	275
6.2 气候变化对水文生态的影响模拟	278
6.2.1 气候波动情景建立	278
6.2.2 气候变化下的流域水文水质预测	279
6.3 流域不同土地利用和气候变化对水文生态的影响模拟	282
6.3.1 藉河流域的水文生态模拟结果	282
6.3.2 罗玉沟流域的水文生态模拟结果	283
第 7 章 基于 TOPOG 模型的小流域生态水文过程分析	286
7.1 TOPOG 模型的优化	287
7.1.1 TOPOG 模型存在问题	287
7.1.2 优化思路	288
7.1.3 模型优化	288
7.2 参数确定	291
7.2.1 土壤参数	291
7.2.2 气象参数	291
7.2.3 植被参数	291
7.2.4 径流泥沙参数	291
7.2.5 参数确定	294
7.3 地形分析	294
7.4 稳态模拟	298

7.4.1	湿度指数模拟分析	298
7.4.2	侵蚀危险指数模拟分析	303
7.4.3	崩塌危险指数模拟分析	308
7.5	生态水文过程动态模拟与适用性检验	310
7.5.1	评价指标的选取	310
7.5.2	径流模拟值与实际值对比分析	311
7.5.3	泥沙模拟值与实际值对比分析	312
7.5.4	TOPOG 模型适应性检验	313
7.6	基于 TOPOG 模型的吕二沟小流域生态水文过程模拟	314
7.6.1	生态水文过程预测模拟	314
7.6.2	水资源变化及再分配分析	316
7.6.3	生态水文过程变化成因分析	318
参考文献		321

第 1 章 绪 论

1.1 环境演变下的水文生态响应

环境演变是当前科学界在不同领域研究的热点问题,它关系着人类的生存和经济发展。国际科学界于 20 世纪 60 年代组织了“国际生物学计划”(IBP),70 年代组织了“人与生物圈计划”(MAB),80 年代组织了“国际地圈生物圈计划”(IGBP)。可以看出,这些计划具有朝着宏观和交叉方向延展、由侧重自然朝着侧重自然与人类相结合发展的趋势。尤其是“国际地圈生物圈计划”的实施,标志着人类对地球环境变化的认识已从单纯学科的研究转而进行以对地圈、水圈、生物圈、大气圈、人类圈以及地球运转轨道变化等共同作用的巨大系统的研究。随着地球上人口的高速增长,人类活动对地理环境形成了巨大的压力,这造成了自然资源的大量消耗,水土流失和荒漠化,严重威胁着干旱、半干旱地带的发展。环境演变的研究内容也越来越广泛,包括大气圈的演变,海岸带变迁,动植物群的演变,陆地水文的变化,以及这些变化的人类因素影响及研究方法等。气候是环境变迁中最活跃的因素,研究过去气候演变的规律,探讨过去人类活动与环境演变的耦合关系已成为目前国际研究的热点。黄土高原地区位于中国境内全球变化反应敏感的生态过渡地带,是近年来中国环境演变研究的重点区域。考虑到本课题研究需要,本书所指的环境演变主要是指黄土高原上的气候变化和土地利用/覆被变化(land-use and land-cover change,LUCC),主要考虑黄土高原气候变化和土地利用/覆被变化这种环境演变下对不同流域水文生态的影响。

水是生命之源,是支撑地球社会经济系统发展不可替代的资源 and 物质基础。但是,近些年来社会发展的步伐越来越快,人口数量也迅速膨胀,不同国家或地区均出现了许多与水相关的问题(李丽娟等,2007)。由于这种全球变化、人类活动的负面影响,造成地球上水的循环在不断发生变化,许多地区正在发生严重的水问题与危机,如洪水、干旱、水体污染、水土流失、荒漠化加剧、地下水超采等,成为限制区域可持续发展的关键性因子,因此变化环境下的水文循环研究也成为国际地球科学发展中的一个重要方面(夏军,2002;魏文秋,1999)。

流域水文生态是全球气候变化和土地利用/覆被变化响应综合作用的整体,近年来全球气候大幅度变暖,水循环加快,降水和蒸发相应地发生很大变化,流域径流对于全球变化如何响应还是未知(Wilby,1995)。无论是气候系统的自然变化,还是人类活动影响的结果,全球气候变暖趋势已被大多数人认同(左海凤,2006),IPCC 在 2001 年气候变化评估报告中指出,在过去的 100 年全球气温平均上升了 $(0.6 \pm 0.2)^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2001)。就我国来说,变暖的速率地域间差异较大,我国东北地区升温幅度最高;也有很多学者对中国近 50 年来的气温变化进行过研究,结论是近 50 年气温明显上升,全国平均气温变化速率为

0.25℃/10a,过去半个世纪以来全国气温平均上升约1.3℃(符淙斌,1996;于梅等,2009)。

土地利用/覆被变化和气候波动对区域水文过程的影响是目前国际水文学最具活力的研究领域(胡宏昌等,2008)。LUCC水文效应的研究具有十分重要的理论意义和实践价值,LUCC也是人类活动最直接的一种表现形式,它引起了下垫面的巨大变化,改变了地表覆被的水分截留量,影响降水资源分布和再分配、地表产水量、覆被蒸散变化,进而影响到流域径流形成、运行机制以及水文情势。20世纪90年代以来,全球环境变化研究领域逐渐加强了对LUCC的关注,这主要与该领域具有全球影响的两大组织“国际地圈与生物圈计划”和“全球环境变化人文计划”(HDP)的推动有关(李秀彬,1996)。一方面,LUCC在全球环境变化和可持续发展中占有重要的地位,它直接反映了环境变化的主导因子——人类活动(Turner,1994;Vitousek et al., 1997),最能表达人类通过与土地有关的自然资源利用活动,土地覆被状况变化对气候、区域水循环、土地质量、生态系统生产力甚至陆地-海洋相互作用等的影响非常深刻(于兴修等,2004);另一方面,地球系统科学、全球环境变化及可持续发展涉及自然和人文多个方面的问题,在这些方面加强自然与社会科学的综合研究,已成为两大学科领域众多学者的共识(黄秉维,1996),在全球环境变化问题中,土地利用/覆被变化可以说是自然与人文过程交叉最为密切的问题。

我国黄土高原地处半湿润半干旱地区向干旱地区过渡地带,水资源分布极不平衡,总体表现为水短缺,气候、土壤、植被分布均表现出强烈的过渡性特征,是我国陆地生态系统的脆弱区和敏感区。有研究表明近50年来,黄土高原地区气候暖干化发展趋势明显(姚玉璧等,2005;信忠保等,2007),同期,黄土高原地区水土保持与生态环境综合治理取得了举世瞩目的成就,黄河流域水土保持生态建设、“三北”防护林、天然林保护工程、退耕还林还草等工程的开展,深刻改变了区域覆被格局和下垫面条件,对水文水资源产生了巨大影响。但黄土高原地区LUCC和气候因素变化对水文要素(径流-泥沙)的影响如何,虽然已有众多学者关注,但因研究区域的时间尺度和空间的差异以及研究手段不尽相同,得到的结论差异也很大(唐丽霞,2009)。

因此,本书以国家自然科学基金“黄土高原地区典型多尺度耦合流域土地利用/覆被的水文生态响应研究(40871136)”为依托,以黄土丘陵沟壑区第三副区的典型多尺度流域为研究对象,研究流域LUCC与气候变化的水文水资源系统效应;就流域的主要气候要素、地表径流、水资源、植被的演替及其相互间的关系等主要水文、气候变化特征及其影响进行研究;充分利用现有的气候、水文、植被和水资源监测网站和先进的数据处理手段、数据分析方法,阐述土地利用变化及森林植被对流域水文生态过程的影响,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LUCC及其水文生态功能响应机理,在土地利用、覆被变化对水循环影响、调控机理方面取得创新,为黄土高原地区生态环境建设、农业可持续发展提供决策支持。

1.1.1 土地利用/覆被变化的水文生态过程响应

土地利用是土地覆被变化最重要的影响因素,土地覆被的变化反过来又作用于土地利用(李秀彬,1996)。两者概念既有密切联系又有本质区别,前者是人类为了生产生活而进行的长期性或周期性的经营或经济活动,是对土地自然生态系统的利用方式及利用状

况,是土地质量和人为干预所决定的土地功能(张丽彤等,2007),如农用地、建设用地、居民用地等;土地覆被是指陆地表面自然形成的或者人为引起的覆盖状况,是自然过程和人类活动共同作用的结果(郑海金等,2003),如森林、草原、冰川等。近几十年来在众多的全球变化问题中,LUCC 研究显得尤为重要,人类活动对土地覆被造成了巨大影响,而且影响到了生物多样性、动植物种群动态、初级生产力等(陈灵芝,1994),其造成的环境影响不仅局限于当地还能影响到较大区域,同时对区域水循环、环境质量等的影响更为深刻、持久。

目前关于 LUCC 对气候变化的影响的研究较多但结论差异很大,主要集中在植被尤其是热带森林面积的减少对降水、温度的影响等方面,一些学者认为植被覆盖变化对温度的影响较大,另有一些学者认为采伐森林可能会改变反照率,从而影响全球温度(张丽彤等,2007)。影响水文的 LUCC 主要有造林和毁林行为、农作物耕种及管理、城镇化建设及湿地管理等(Calder,1993),同时,区域和地方尺度也是引起 LUCC 最重要的来源与驱动力。LUCC 影响降水的截留、填洼、下渗、蒸发等水文要素及其产汇流过程,并进而影响流域出口断面的流量过程,对流域洪涝、地下水动态等产生重大影响(万荣荣和杨桂山,2004)。

1. LUCC 对截留/蒸散发的影响

降水的部分水量会被植被截留,进而由于蒸发损失掉,截留量随降水量、降水类型、雨强等发生变化,并且与植被类型及密度、生长期、气候条件等密切关联。稠密的森林冠层必须考虑相当大的截留损失,而对于矮生稀疏的植被则蒸发损失非常小常常可以忽略(熊立华和郭生练,2004)。森林植被的枯枝落叶层水文生态作用表现的形式与内容较多,除了与林冠层一样截持降水外,还是实现吸收和阻延地表径流、增加降水入渗等水土保持功能的作用层(吴钦孝等,1998)。在水量平衡研究中截留举足轻重,有学者研究认为树冠拦截 10%~40% 的雨量,一般为 10%~30% (Levia and Frost, 2003; 万荣荣和杨桂山, 2004);余新晓等(2004)研究了不同森林植被冠层和枯落物层的截留过程,发现油松和刺槐冠层截留率分别为 26.6% 和 10%,各森林枯落物层的最大持水率平均为 183.4%;我国各类植被的年林冠截留量为 134~626mm,平均截留率为 11.4%~34.4%,变动系数为 6.7%~55.1%(李文华,1999;张志强等,2003)。

土地利用变化对蒸散发的影响较为显著。邓慧平和李秀彬(2003)对梭磨河流域土地覆被变化的水文效应进行了模拟,认为在其他条件不变的情况下,随着土地覆被和冠层最大截留量的增加,截留蒸发和流域总蒸发增加,植被蒸腾和土壤水蒸发减少。张晓萍等(2007)采用 Zhang 模型对黄河河龙区间不同土地覆被类型的水平衡特征进行了探索,结果表明区间南部林区由于大面积林地截流蒸发的影响,该区蒸发系数较高;西北风沙地貌区受粉沙覆盖层和地下径流补给影响,蒸发系数较低;中部黄土丘陵沟壑区介于两者之间。Li 等(2009)对 1980~2000 年黑河流域土地利用和气候变化的水文响应进行了分析,表明土地利用变化导致蒸散发增加了 8%。Dunn 等(1995)根据 8 种土地利用类型的蒸散发参数,研究土地利用变化和蒸散发的相互关系,进而对流域水文产生的影响。土地利用变化会引起河道湖泊等水体面积、植物可用土壤水、植被叶面积指数(LAI)等的变

化,从而改变蒸散发的时空分布(Calder, 2000),此外,不同土地利用类型植被覆盖、根系深度以及反照率不同,因而蒸发速率差异很大。通过 LAI 的变化可定量估算蒸散发,蒸散发与 LAI 之间存在的密切关系得到许多学者的关注(Schulze, 2000)。

2. LUCC 对径流量的影响

植被变化与流域水文循环及过程构成一个反馈调节系统,是目前水文学家关注的重点对象,LUCC 的水文响应研究中森林水文效应备受关注。关于森林变化对流域径流量影响的研究起步较早,但一直存在较多争议(刘世荣等, 1996; Andréassian, 2004; Bruijnzeel, 2004)。魏晓华和李文华等(2005)综述了森林变化对年径流量、洪峰与枯水径流的影响,探索森林植被覆盖变化与径流关系的一致性和复杂性,认为其一致性主要表现在由较长时间尺度表达的年径流上。但造林或采伐森林等流域管理措施对径流泥沙的影响比较复杂,绝大多数流域对比试验表明采伐森林增加年径流量,而荒地造林会减少年径流量。对于针叶树,当覆被变化 10% 时,流域产水量变化 40mm;对于落叶阔叶树产水量变化 25mm,而灌草则变化 10mm,并且有学者进一步指出当植被覆被变化少于 20% 时很难检测到流域产水量变化(Bosch, 1982; 张志强, 2006)。森林变化与洪峰径流的关系更加复杂,经过一个世纪的森林水文研究,几乎各种结论并存(正影响、负影响和无影响),而且影响范围或差异非常大(魏晓华等, 2005)。

LUCC 改变了植被的截留量、土壤水分的人渗能力和地表蒸发等因素,进而影响到流域的水文情势和产汇流机制。欧春平和夏军(2009)采用 SWAT 模型对海河蒸发、径流量的 LUCC 响应进行了模拟,表明人类活动总体上的影响是流域蒸发量增加,地表、地下径流以及土壤水量在减少。李子君和李秀彬(2008)利用降水-径流经验模型定量分析了潮河降水和人类活动对流域年径流的影响,发现 1981~2005 年受水利工程、引水及水土保持等人类活动影响的减水量占总减水量的 83.2%,贡献率远大于降水因素(16.8%)。Wang 等(2009)分析了黄土高原小流域近些年水土保持措施(植被恢复、梯田建设等)对流域产水量的影响,同时认为必须考虑气候变异对西北干旱环境的影响。陈月红和余新晓等(2007)从降水-侵蚀产沙、径流-产沙关系入手,统计分析了黄土区第三副区典型小流域水土保持措施对径流和侵蚀产沙的影响,表明两者的年际变化是随流域内水土保持措施全面实施和林草覆被的增加而逐渐减少。

Wang 和 Kang(2008)根据不同的气候和土地利用变化情景分析了杂木河流域的水文响应,结果表明流域山陵区林地下降而草地增加,模拟径流呈增加趋势,但温度增加导致径流下降,温度增加 1℃,年径流则下降 1.1%;有关专家曾对长江上游一中尺度流域气候变化和土地覆被的流域水文响应进行了模拟,认为在过去 40 年气候变化是径流变化的主要因素,贡献率为 60%~80%,而 LUCC 只占 20% 左右。国外学者关于造林对径流、蒸散等过程的影响比较关注,很多地区为了木材生产而进行大范围的造林活动,森林覆盖的提高增加了蒸腾作用,从而对流域产水及区域水资源产生很大影响。有学者对位于南非德拉肯斯堡山 Cathedral Peak 研究区的两个小流域进行了不同植被覆盖的径流响应差异研究,旨在揭示大规模经济林建设对该区水文过程及水资源的影响,发现在相同参数条件下黄背草地小流域和展松林地小流域模拟结果差异较大,这可能是由于没有考虑后者

成熟林的蒸腾作用引起的(Govender, 2005)。Hernandez 等(2000)利用 KINEROS 和 SWAT 模型对美国亚利桑那州东南的 Walnut Gulch 流域进行了土地覆被变化的径流响应分析,表明两个模型对该区模拟结果良好。

3. LUCC 对侵蚀产沙的影响

土壤侵蚀作为土地利用/覆被变化引起的主要环境效应之一,两者的关系研究已经成为一项新的重要课题(吴秀芹, 2003),土壤侵蚀和泥沙输移在坡面与流域尺度上对 LUCC 的响应是土壤学、水文学、地理学家共同关注的研究课题。在不同尺度的流域、流域的不同区域影响侵蚀产沙的因素很多,主要有降雨、植被、土壤、土地利用、地貌等(廖义善和蔡强国, 2008)。普遍观点认为人类活动是造成土壤侵蚀的主要原因,特别是不合理的土地利用方式和植被覆盖的减少。关于森林对河川径流、泥沙的调节作用,国内外学者已经进行了很多研究,但还存在着不少争论,张洪江等(2007)采用流域自身对比法,对三峡库区雾渡河流域森林变化的径流泥沙响应进行了探讨,结果表明,森林覆盖率每下降 1%,洪枯比增加 0.83,年输沙模数增加 $67.5\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;活立木总蓄积量每减少 10^4m^3 ,洪枯比增加 0.88,年输沙模数增加 $71.3\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。张志强等(2005)对黄土区吕二沟小流域土地利用变化对流域产沙的影响进行了分析,表明在林草植被增加、坡耕地减少的情况下,减沙效应明显,但其减小的程度还取决于年降水量,各月降水越多,月日均含沙量减少越多。余新晓等(2006)在该区也有类似发现,并且量化了植被覆盖和降水变化对该流域土壤侵蚀量变化的贡献率分别为 45.7% 和 54.3%,水土流失受降水的影响要略大于受植被覆盖的影响。赵护兵等(2004)通过对几种乔、灌、草植被类型的径流小区实测数据分析得出,就减少径流损失而言,灌木作用最为明显,其次为草本,乔木最差;就减少土壤侵蚀而言,仍然是灌木作用最为明显,乔木次之,草本最差,他们同时建议在黄土丘陵沟壑区的植被建设应优先种植适应性强、耐旱耐贫瘠的灌草,更有利于水土流失治理。方海燕和蔡强国(2007)在黄土区的岔巴沟流域进行了泥沙输移的时间尺度动态研究(洪水事件内、月和季节及年际),主要结果包括在洪水内洪峰超前于沙峰的事件占总洪水事件的 63.2% 等。

有学者对美国俄克拉何马州中部的 Fort Cobb 流域实施水土保持措施前后两个时期的流量-悬移质输沙率关系进行了分析,结果表明实施水土保持措施前和实施水土保持措施后的泥沙输移量分别为 $760\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $108\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,认为这与近些年流域土地利用、管理措施变化以及土壤保持措施有关(Garbrecht and Starks, 2009)。Setegn 等(2009)运用 SWAT 模型对埃塞俄比亚西北部塔纳湖水土流失进行了模拟,表明该区子流域泥沙产量达到 $30\text{t}/\text{hm}^2$,并根据模拟结果发现流域面积的 18.4% 属于土壤侵蚀严重区,为今后流域治理提供政策支持。有学者采用人工神经网络(ANN)和 SWAT 模型对伊朗北部 Kasilian 小流域(69km^2)进行了泥沙负荷研究,同时进行了不确定性分析,表明 SWAT 模型在模拟高泥沙负荷方面具有明显优势,而 ANN 模型则更适合评估中低含量的泥沙负荷(Talebizadeh, 2010)。也有部分国外学者从恢复生态学原理出发,对植被恢复过程中的水沙效应和水文效应进行研究,验证了灌草类覆被的增加提高入渗,减少地表水土流失;Francisco 等(1998)研究了不同植被在不同演替阶段的坡地水土流失特征,发现随着植被的恢复,其对地表的防护功能、土壤渗透和持水能力不断得到加强,对防止土

壤侵蚀、减少泥沙负荷有重要作用。

目前,关于侵蚀产沙的研究多集中于坡面尺度,流域尺度的研究主要借助于各种模型进行情景模拟,资料收集及参数设置要求很高,由于LUCC是一个非常复杂的时空过程,需要全面考虑人类及自然环境中的驱动力因子、土地利用决策过程等,因此植被和地面物质资料的获取费时又费力,并且定量化表达比较困难,导致流域侵蚀产沙与植被变化关系的研究一直是流域土壤侵蚀产沙研究的薄弱环节之一(卢金发和黄秀华,2003)。

1.1.2 气候变化的水文生态响应

水文循环是气候系统的重要组成部分(张建云,2010),近100年来,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,对水循环的各个环节产生直接影响,导致包括降水、蒸发、入渗、土壤水分、河川径流和地下水流等一系列的变化,从而改变了区域水文循环的现状,引起了水资源在时间空间上的重新分配(丁相毅等,2010)。全球气候变化关系到人类的生存与可持续发展,涉及国家政治与安全、社会经济发展、人类协调与合作等一系列问题。气候变化改变了水文循环过程,影响着水资源的结构与功能,将对水资源开发利用带来新的挑战(刘昌明等,2008)。因此,评估气候变化对水文水资源的影响以及适应性对策研究是气候变化研究领域非常重要的研究内容,这对水资源安全和生态环境保护都具有重要的意义。

1. 气候变化对水文循环的影响

水文循环是气候系统的关键组成部分,既受气候系统的制约,又对气候变化进行反馈。对于流域水循环而言,其特征在很大程度上是由所处的气候条件所决定的,或者说,流域的气候条件在客观上决定了流域的水循环背景。气候系统通过降水、气温、日照、风、湿度、太阳辐射等因子直接或间接地影响着水循环过程(刘昌明等,2008)。从20世纪全球陆面降水观测数据来看,20世纪全球陆地降水约增加2%,但各个地区实际降水变化并不一致,北半球中高纬度大陆地区降水明显增多,北纬 $30^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 陆地地区降水量平均增幅达7%~12%,但是北半球副热带地区降水可能减少了3%,非洲北部、南美洲沙漠地区减少更为明显;南半球(南纬 $0^{\circ}\sim 55^{\circ}$)大陆区域的降水量可能增加了2%左右(气候变化国家评估报告,2007)。

从我国范围来看,近100年来的年降水量呈现出明显的年际和年代震荡,但是趋势性变化不明显。从近50年来看,我国不少学者进行了大量有价值的研究,王遵娅等(2004)利用全国740个气象站资料,对全国温度、降水等5个基本气象要素特征进行了全面分析,表明近50年中国降水略有减少,但夏季降水明显增加,尤其是长江中下游、华南、西北西部地区,而华北地区夏季降水减少趋势明显;温度显著升高,90年代增温最强,西南地区到80年代末也出现大幅升温。于淑秋讨论了我国西北地区近50年的降水和温度变化,发现两者在1986年前后发生了一次明显的跃变,比全国的气候跃变晚6~8年,跃变后比跃变前降水和温度均显著增加(于淑秋等,2003)。

总之,在全球增温的大背景下,我国地区温度总体上显著上升,上升了 $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,研究表明,全球平均气温在20世纪升高约 0.6°C ,而预测到21世纪末全球地表平均增温