



生态水文学研究系列专著

流域生态水文 过程与机制

余新晓 贾国栋 赵 阳 等/著
王贺年 牛健植 孙丰宾



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

生态水文学研究系列专著

流域生态水文过程与机制

余新晓 贾国栋 赵 阳 王贺年 牛健植 孙丰宾 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以北京山区典型小流域和海河上游山区为主要研究区,探讨以气候变化和土地利用变化为主的环境演变下,流域生态水文响应过程与机制。此外,本书还基于模型对植被变化下的径流过程以及不同尺度流域生态水文变化情况进行模拟和预测,评价不同尺度流域生态水文要素对环境变化的敏感性和脆弱性,为华北地区的流域生态水文研究和水资源管理等方面提供理论基础依据。

本书不仅可以作为水文学、地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作者的参考资料,也可以作为流域水资源管理和生态环境相关技术人员、行政管理人员的科学行动指南。

图书在版编目(CIP)数据

流域生态水文过程与机制/余新晓等著. —北京:科学出版社, 2018.7

生态水文学研究系列专著

ISBN 978-7-03-058182-2

I. ①流… II. ①余… III. ①流域-区域水文学-研究 IV. ①P343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 139365 号

责任编辑:朱 丽 宁 倩/责任校对:张小霞

责任印制:张 伟/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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 7 月第一次印刷 印张:18

字数:426 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



本书所涉研究成果得到

国家自然科学基金重点项目“基于稳定同位素的典型森林生态系统水、碳过程及其耦合机制研究”(41430747)

国家自然科学基金青年基金项目“北京山区主要造林树种水分利用机制及其生理生态响应研究”(41401013)

国家科技支撑计划“‘三北’地区防护林体系结构定向调控技术与示范”(2015BAD07B030201)

科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2018_014207_000024)

北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015 ZCQ-SB-03)

共同资助

主要参编人员(以姓氏拼音为序):

贾国栋	牛健植	孙丰宾
王贺年	王友生	徐晓梧
余新晓	张秋芬	张桢尧
赵 阳		

序

在全球气候变暖及极端天气频发等自然背景条件下，人类活动干扰强度不断加强，人类生存环境发生了较大改变，水资源缺乏、生物多样性降低等生态环境问题日益严重。水是支撑人类社会发展不可缺少和不可替代的自然资源，随着社会经济的发展，水资源需求量越来越大。水资源危机成为困扰世界的三大危机之一，水资源短缺及由此引发的水生态安全问题严重威胁着社会经济可持续发展。

土地利用变化与全球气候变化、生态环境演变、生物多样性的减少，以及人类和环境相互作用的可持续性等相关，它直接或者间接地影响流域、区域或者全球的水文过程。诸多河流河道面临枯竭断流的困境，随之而来的土地沙化、土地退化、湿地面积急剧萎缩等生态环境问题日益严重。人类活动和气候变化影响了水文过程和水资源量的变化，水文水资源又会反作用于这种影响，这种相互作用的不确定性和双向性使得水文过程的研究比较复杂而且发展比较缓慢。

《流域生态水文过程与机制》一书是余新晓教授及其团队多年综合研究成果的集中总结，是基于国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金青年基金项目、“十二五”后续项目和林果业生态环境功能提升协同创新中心项目等完成的。该书涉及的重大研究成果是以北京山区典型小流域和海河流域上游山区为研究区域，从生态水文学角度来揭示流域土地覆被景观格局变化特征及流域气候水文要素演变规律，系统反映了气候变化和土地利用/森林覆被(LUCC)等环境要素变化下流域生态水文响应过程和机理。在此基础上基于国外现有分布式水文模型进行流域尺度的水文过程模拟，揭示森林植被对水资源形成过程的影响机制，为我国华北地区的小流域生态环境建设和可持续发展提供重要的科学依据，并有针对性地周边土地利用/森林覆被类型调整提供理论依据，为今后进一步加强水资源规划和管理奠定了坚实的基础，同时对于干旱地区的水资源管理和规划也具有很强的指导意义。

该书内容均为水文学研究领域的热点问题，引领该学科的发展方向，在理论框架、新方法和新技术方面做了很多开创性的工作，在推动生态水文学和水资源管理的关键技术研究方面进行了有益的探索，对我国进行流域生态环境建设和综合管理研究起到了积极的推动作用。

该书不仅为水文学、地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作者提供有益的参考，也为我国流域水资源管理和生态环境建设相关技术人员、行政管理人员提供了一套可供指导的参考书。该著作的出版，无疑将对我国生态水文学和流域水文学的深入发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士 王浩

2017年9月

前 言

20 世纪以来,在世界人口剧增和经济高速发展的过程中,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环境问题越来越严重,对当前人类经济可持续发展构成极大的威胁。随着社会经济的发展,人类赖以生存的生态水环境成为人类社会发展无可替代的自然资源,水资源需求量越来越大,水资源危机成为困扰世界的三大危机之一,水资源短缺及由此引发的水生态安全问题严重威胁着社会经济的可持续发展。从流域径流研究出发,探讨气候变化和土地利用/森林覆被变化对水资源的循环特征的影响,是流域水资源规划、管理与可持续发展的核心问题,对于水资源的合理开发和高效利用具有重要的实践意义。

近年来,受自然因素及人类不合理活动影响,华北地区面临严重的水资源危机,海河流域作为华北地区开发较早的流域之一,是中国十大流域中干旱问题最为严重和突出的流域,是我国最缺水的地区之一。而海河山区作为海河流域的主要产水区,对其水文要素的研究具有重要的意义。海河流域受自然环境变化及人类活动影响的强度和广度进一步加深,水资源短缺越发严重。海河流域山区现已修多座大型水库,遇干旱年份,山区径流绝大部分被水库拦蓄,水库下游几乎全年无水。流域内水资源消耗量巨大,地下水超采状况严重。海河流域在七大流域中水质最差,水污染状况最为严重。因此,有必要以海河流域为研究对象,分析该地区人类活动与环境演变的关系,分析土地利用/覆被景观格局演变规律及其驱动力,研究降水的多尺度分布规律和径流、泥沙、洪枯水形成、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,为海河流域土地利用规划和管理、水资源保护与高效利用及生态系统稳定维持等方面提供基础理论依据。

本书主要基于作者主持的国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金青年基金项目、“十二五”后续项目和林果业生态环境功能提升协同创新中心项目等的研究成果。全书共分 8 章。第 1 章为绪论,主要介绍环境演变下生态水文过程和机制的研究现状,以及研究区域概况与研究方法;第 2 章分析研究区不同尺度流域土地利用/覆被变化过程;第 3 章和第 4 章分析环境变化背景下不同时间尺度下各流域气象要素和水文要素的变化趋势和特征;第 5 章和第 6 章分别探讨不同流域水文要素对气候和土地利用/覆被变化等环境变量演变的响应;第 7 章基于 Zhang 模型,分析以森林、草地、耕地农作物为主的不同植被类型对生态水文要素的影响,并对区域森林植被对流域径流过程的影响进行模拟分析;第 8 章基于分布式水文模型 WETSPA 分析不同尺度流域生态水文变化情况,并根据模型进行情景设定,分析评价不同尺度流域水文资源对变化环境的敏感性和脆弱性。

本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，余新晓教授团队成员通力合作，从野外调查到数据整理，进行了大量的资料分析工作。考虑到本书的系统性，书中参考了大量文献，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！

余新晓

2017年10月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 环境演变下的生态水文响应	1
1.1.1 气候变化的生态水文过程响应	1
1.1.2 土地利用/覆被变化的生态水文过程响应	4
1.1.3 流域尺度森林变化的生态水文过程响应	6
1.1.4 流域生态水文过程响应研究方法	8
1.1.5 存在的主要问题及发展趋势	10
1.2 研究区概况	12
1.2.1 半城子流域概况	12
1.2.2 红门川流域概况	14
1.2.3 海河流域概况	16
1.3 研究方法	18
1.3.1 基础数据收集	18
1.3.2 水文分析方法	21
1.3.3 土地利用/植被动态变化过程	26
1.3.4 景观分析方法	28
1.3.5 模型模拟方法	28
第 2 章 流域土地利用/覆被景观与森林结构变化过程分析	30
2.1 流域土地利用/覆被景观变化及驱动力分析	30
2.1.1 流域景观类型划分和指数选取	30
2.1.2 流域土地利用/覆被景观变化分析	33
2.1.3 流域土地利用/覆被景观变化驱动力分析	42
2.2 流域森林景观格局及结构因子变化分析	43
2.2.1 流域森林覆被率变化分析	44
2.2.2 流域森林生物量变化分析	46
2.2.3 流域森林单位面积生物量变化分析	50
2.2.4 流域森林景观格局变化分析	53
2.3 区域土地利用现状及变化分析	55
2.3.1 流域上游山区土地利用现状及其变化	55
2.3.2 土地利用程度综合指数变化	58
2.3.3 水利工程建设变化	59
第 3 章 流域气象要素变化分析	61
3.1 降水变化规律分析	61
3.1.1 降水年际变化规律及趋势检验	61

3.1.2 产流性降水变化规律及趋势检验	65
3.1.3 降水年内变化分析	67
3.1.4 降水量周期性变化规律	69
3.2 气温变化规律分析	71
3.2.1 气温年际变化及趋势性检验	71
3.2.2 气温年内变化规律	72
3.3 潜在蒸散发量变化规律	73
3.3.1 潜在蒸散发量年际变化及趋势分析	73
3.3.2 潜在蒸散发量周期性变化规律	78
第4章 流域水文要素变化分析	81
4.1 径流变化规律分析	81
4.1.1 径流年际变化规律及趋势分析	81
4.1.2 径流年内变化规律	87
4.1.3 径流周期性变化规律	88
4.1.4 径流突变点分析	90
4.2 枯洪水变化规律及趋势性检验	93
4.2.1 洪水总量变化规律及趋势分析	93
4.2.2 枯水流量变化规律及趋势分析	99
4.3 泥沙变化规律及趋势性检验	101
4.3.1 泥沙年际变化规律及趋势分析	101
4.3.2 泥沙周期性变化规律	102
第5章 气候变化和人类活动对流域径流的影响	105
5.1 径流对气候变化的敏感性分析	105
5.1.1 敏感性分析理论方法	105
5.1.2 径流对降水的敏感性分析	109
5.1.3 径流对潜在蒸散发的敏感性分析	115
5.1.4 径流对干燥度的敏感性分析	120
5.2 气候变化和人类活动对流域径流的影响	123
5.2.1 流域径流变化	123
5.2.2 气候变化对流域径流的影响	124
5.2.3 人类活动对流域径流的影响	127
5.2.4 不同土地利用类型对流域径流的影响	129
5.3 流域径流变化驱动力差异分析	131
5.3.1 气候变化影响差异分析	131
5.3.2 土地利用变化影响差异分析	132
5.4 流域洪水总量影响因素分析	132
5.4.1 海河流域上游山区各类洪水总量	132
5.4.2 各类影响因子对流域洪水总量的影响	134
5.4.3 流域洪水总量影响因素多元统计分析	139
5.5 流域枯水流量影响因素分析	148
5.5.1 海河流域上游山区各类枯水流量	148
5.5.2 各类影响因子对流域枯水流量的影响	149

5.5.3 流域枯水流量影响因素多元统计分析	154
第 6 章 气候变化和人类活动对流域泥沙水质的影响	161
6.1 气候变化与人类活动对区域泥沙的影响	161
6.1.1 区域输沙模数变化	161
6.1.2 气候变化/人类活动对区域输沙量的影响	162
6.1.3 气候变化和人类活动贡献率分析	162
6.2 流域泥沙影响因素分析	163
6.2.1 流域多年平均输沙模数	163
6.2.2 各类影响因子对流域泥沙的影响	164
6.2.3 各影响因素贡献率分析	167
6.3 流域总径流水质影响因素分析	169
6.3.1 流域总径流水质特征	169
6.3.2 总径流水质影响因素相关性分析	170
6.3.3 总径流水质影响因素贡献率分析	171
6.4 流域洪水径流水质影响因素分析	174
6.4.1 流域洪水径流水质特征	174
6.4.2 洪水径流水质影响因素相关性分析	175
6.4.3 洪水径流水质影响因素贡献率分析	176
6.5 流域枯水径流水质影响因素分析	179
6.5.1 流域枯水径流水质特征	179
6.5.2 枯水径流水质影响因素相关性分析	180
6.5.3 枯水径流水质影响因素贡献率分析	181
第 7 章 流域森林植被对生态水文要素的影响分析	185
7.1 不同植被对流域径流的影响	185
7.1.1 森林对流域径流的影响	185
7.1.2 草地对流域径流的影响	190
7.1.3 耕地农作物对流域径流的影响	196
7.2 流域森林格局与结构变化对径流及其组分影响分析	202
7.2.1 流域森林景观格局变化对径流及其组分影响分析	202
7.2.2 流域森林覆被率变化对径流及其组分的影响分析	213
7.2.3 流域森林生物量变化对径流及其组分的影响分析	221
7.2.4 流域单位面积森林生物量变化对径流及其组分的影响分析	225
7.3 森林植被对流域输沙的影响	228
7.3.1 森林对流域输沙模数的影响	228
7.3.2 林草覆盖对流域输沙模数的影响	229
7.3.3 耕地农作物覆盖对流域输沙的影响	230
第 8 章 流域森林覆被变化下的径流模拟分析	231
8.1 WETSPA 模型结构及原理	231
8.2 WETSPA 模型数据库构建及流域参数提取	234
8.2.1 模型数据库构建	234
8.2.2 流域空间离散化	236

8.3 WETSPA 模型参数率定与验证238

8.3.1 模型模拟结果的评价方法238

8.3.2 WETSPA 模型参数率定239

8.3.3 模型径流模拟与验证的结果分析240

8.4 WETSPA Extension 模型与数字滤波法径流分割结果比较253

8.4.1 数字滤波法的介绍253

8.4.2 数字滤波法进行流域径流分割254

8.4.3 两种径流分割结果对比255

8.5 流域森林覆被变化的径流模拟分析256

8.5.1 流域实际森林植被类型的径流响应分析256

8.5.2 流域不同情景森林覆盖率和单位面积生物量的径流响应260

参考文献264

第1章 绪 论

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。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。本书所指的环境演变主要是指华北地区的气候变化和土地利用/覆被变化(land-use and land-cover change, LUCC),主要考虑气候变化和土地利用/覆被变化这种环境演变对不同流域水文生态的影响。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。

1.1 环境演变下的生态水文响应

1.1.1 气候变化的生态水文过程响应

气候变化是指气候平均状态随时间(10 年或更长)发生统计意义上的显著变化(马荣田等, 2007)。国际上有关气候变化的相关研究开始于 20 世纪 70 年代,1988 年政府间气候变化专门委员会(IPCC)组建成立,旨在对世界范围内有关全球气候变化的现有科学、技术和社会经济信息进行评估,并为政府决策者提供气候变化的科学基础。成立至今,IPCC 已分别于 1990 年、1995 年、2001 年、2007 年、2011 年完成了 5 次全球气候变化评估报告。这些报告的提出,对国际国内社会全面认识气候变化现状及存在问题提供了参考依据,同时也为开展全球气候变化下的水文响应提供了重要数据来源和科学依据。进入 21 世纪后,IPCC 分别在巴西、中国、墨西哥、意大利等国家相继召开了国际会议,讨论与气候变化对区域水文过程和水资源的影响相关的研究和分析(张建云等, 2009)。

国内外相关研究中,气候变化对流域和区域水文过程及水资源变化的影响大体分为两类。一类是以区域和流域的长时间序列同期气象水文数据资料(包括降水、气温、径流等)进行时间序列分析,建立径流水资源量与气候要素之间的相关关系,并提出一些经验型的统计模型,以此来研究气候变化对流域水文过程、水资源的影响。在这方面的众多研究中,Langbein(1949)的研究最具代表性,他以美国的一些地区作为研究区域和对象,首次对研究区的径流年际变化及气候变化对流域径流的影响进行了全面的分析。Stockton 和 Boggess(1979)参考了类似的相关研究,也选择了利用时间序列分析的方法来研究气候变化及其对流域径流等的影响。区域或流域径流等水文资料的长期观测数据最早出现在 1807 年,在长期观测的基础上,国内外许多研究的结果表明,随着气温的升高,全球许多地方的区域径流均表现出增加的趋势,增加幅度约为 $4\%/^{\circ}\text{C}$ (Labat et al., 2004)。北

极圈地区主要河流的径流,在最近的六十多年里(1934~2000年)河川径流量也有了一定的增加趋势(Peterson et al., 2002)。有关气候变化对区域水资源过程的影响,我国研究者们也进行了大量的分析和研究,傅国斌(1991)以华北地区作为研究区域,利用统计模型的方法对气候变化导致的华北地区水文过程变化进行了初步分析,并在研究中引用了Flohn(1979)对气候变化的预测结果;张国胜等(2000)以黄河上游地区作为研究的区域,对研究地区近38年(1961~1999年)的径流量及其与气象因子之间的趋势关系进行了研究,并着重分析了干旱气候条件对流域水资源的影响;丁永建等(1999)在流域水文资料数据不足的情况下,应用数理统计方法,对各影响因子的影响主次程度进行了分析,以此明确什么因子是影响流域径流的主要因子;赵付竹等(2008)以澜沧江流域作为研究区域,基于水量平衡原理,研究了气候变化对流域径流的影响,结果表明,气候变化过程中降水的变化对流域径流的影响显著,而气温变化的影响则并不显著;景元书等(1998)以长江干流地区作为研究区,基于研究区长时间序列(80年)的径流、降水、气温等观测数据,对气候变化影响流域径流量的过程进行分析,结果表明,降水的增加将导致流域径流有增加的趋势,而气温的升高将导致流域径流有减少的趋势;汪美华等(2003)对区域的气候因子与流域径流进行多元回归分析,模拟了它们之间的经验型的统计模型,并以淮河作为研究区域,以区域内的3个子流域作为研究对象,以模拟的15种气候变化情景作为背景,分析了流域径流的变化趋势,结果表明,气候变化方式、类型、变化趋势的不同对流域径流的影响也有所差异,在不同研究流域的研究结果也有所不同,而在不同季节的研究结果也不尽相同。

在气候变化对流域径流的影响的众多研究中,另一个研究类型是利用流域水文模型来进行研究和模拟,即基于水文过程和现象的理论原理,提出某些概念性的水文模型,以此来分析气候变化与流域径流之间的相关关系及不同气候变化条件下的流域水文过程的差异(石教智, 2006)。Remec和Schaake(1982)最先采用这种方法来研究气候变化对流域径流的影响;Glick(1987)参考了Thomthwaite(1949)的研究结果,基于他们研究结果中提出的水量平衡模型,并对该模型进行一定的改进,在评估气候变化影响水文过程的分析上进行了应用;Faith等(2009)以维多利亚湖流域作为研究地区,基于SWAT(soil and water assessment tool)模型设置不同的气候变化情景模拟径流的变化过程,结果表明,该区域降水量增加将引起流域径流量明显的增加趋势;Robert和Brooks(2009)分析了全球气候变化对美国东北部的森林水文特征的潜在影响。在应用水文模型来研究和分析气候变化对流域径流的影响方面,我国研究者也进行了大量的研究。游松财等(2002)基于修正的水量平衡理论,设置不同气候情景,对中国不同地区径流量的变化过程进行模拟,其研究结果表明,流域径流量在不同的气候背景条件下变化也不同,在空间上存在一定的差异性;刘春蓁(1997)利用综合水量平衡模型和新安江模型,建立了与全球气候模式(global climate models, GCMs)的接口模型,对我国7个流域在未来气候条件下的径流量的可能变化趋势进行模拟;高彦春等(2002)以华北地区作为研究区域,建立了相关的动力学模型,通过设置不同气候情景,对水资源供需变化进行了研究;丁相毅等(2010)将2个不同的水文模型进行耦合,对海河流域过去和未来30年时段内的水文过程进行模拟,并分析了气候变化对研究区域水文过程的影响;张建云等(2009)以黄河中游地区作为研

究区域,对不同气候条件情景下的流域径流变化进行了模拟,结果表明,气温每升高1℃将导致流域水资源量减少 3.7%~6.6%,相比气温,降水变化导致的径流变化更为剧烈,10%的降水量的减少将导致流域水资源量减少 17%~22%。

当前,预测全球和区域气候变化对水文水资源影响的研究也较多(Sellers et al., 1996; Niemann et al., 2005; Abramopoulos et al., 1988),有关气候变化模拟预测以采用 GCMs 进行研究为主,该方法被认为是提供未来气候变化趋势预测评估的有效方法,它可以较好地模拟不同时期全球范围或区域范围内的地表平均降水特征和气温等年月日尺度变化过程(雷水玲, 2001; 李克让和陈育峰, 1999; 范广洲和吕世华, 1999)。Hulme 等(1999)采用 GCMs 及影响模型研究人为气候变化与自然气候变异对流域年径流和农业生产的相对影响,并给出当气候变化大于自然气候变异标准差的 2 倍时,气候变化才是显著的判断依据。Milly 等(2005)采用多个 GCMs 集合和统计显著性检验技术模拟 1900~1998 年期间全球大尺度径流分布,并认为气候变化已经对 1970 年以后全球径流分布产生影响,且气候强迫信号在欧亚大陆北部和北美西北部的高纬地区更为显著。Nie 等(2011)基于 SWAT 模型分析了美国某流域土地利用变化对流域径流的影响,结果表明,城镇建设用地面积增加是导致流域年径流量减少的主要原因。

气候变化包括气候的自然波动及人类活动引起的变化,即年代际之间的变化。气候影响评价模型是目前广为应用的方法,在气候变化对流域水文水资源影响的研究中,模型模拟成为一种重要手段,采用水文模型研究气候变化对流域水资源影响目前存在两个特点:①流域水文模型由统计模型或概念模型向基于物理过程的半分布或分布式模型转化;②模型模拟尺度由较大时间尺度(年)向小时间尺度(日或次洪水)转化。水文模型模拟能力高低是评价模型适用性的关键,相关研究表明,多数模型对于湿润半湿润地区流域水文模拟均可得到较好的模拟效果,而对于干旱半干旱地区而言,水文模型参数不确定性对流域水文模拟精度的影响是该区域流域水文模型面临的巨大挑战,同时也是评价结果不确定性的主要来源之一(王国庆等, 2008)。表 1-1 为目前在气候变化影响流域水资源研究中的常用模型。

表 1-1 气候变化影响评价模型

相关文献	研究流域	代表性模型
关志成等(2001)	北方寒冷地区	水箱模型
王光生和夏士淳(1998)	辉发河五道沟流域	SMAR 模型
刘春藁和田玉英(1991)	华北地区	非线性水量平衡模型
张洪刚等(2008)	汉江流域	半分布式两参数月水量平衡模型
郝振纯等(2011)	淮河流域	新安江月分布式模型
王国庆等(2008)	湿润半湿润地区	月水量平衡模型
Vandewiele 等(1992)	汉江、东江流域	五参数月水量平衡模型
张永强等(2013)	华北地区	非线性统计模型
英爱文和姜广斌(1996)	辽河流域	WatBal 模型

续表

相关文献	研究流域	代表性模型
陈军锋和张明 (2003)	梭磨河流域	集总式水文模型 (CHARM)
王守荣等 (2002)	滦河流域	DHSVM 模型
Wiberg 和 Strzepek (2000)	中国九大水区	CHARM 水文模型
Middelkoop 和 Rotmans (2005)	莱茵河	RHINEFLOW 模型
Mimikou 和 Baltas (1997)	希腊北部 Aliakmon 河	WBUDG 月水量平衡模型
Arnell (1999)	全球范围内 60km×60km 格点	以水量平衡模型为基础的大尺度水文模型
杨桂莲等 (2003)	洛河流域	SWAT 模型
Mac Kirby 等 (2003)	澳大利亚首府地区	SIMHYD 模型
袁飞等 (2005)	海河流域	大尺度陆面水文模型-可变下渗能力模型 VIC
舒晓娟等 (2009)	中国广州流溪河流域	WETSPA 模型
莫菲 (2008)	中国六盘山洪沟流域	SWIM 模型

众多研究表明,区域不同或气候情景设置的差异对水文要素影响存在明显的差异性,张世法等 (2010) 提出,不同气候模式的模拟结果之间、与实测值之间不仅存在数量上的差异性,而且在定性方面甚至出现相反的结果,不确定性十分显著。在全球气候变化下,合理地预测未来气候的变化趋势,并采用有效的方法对水文过程进行研究和模拟已成为水文学研究的热点和难点。

1.1.2 土地利用/覆被变化的生态水文过程响应

气候变化下的土地覆被变化是影响区域水分循环的主要因素之一,同时也是流域产水量发生年际变化的主要驱动力 (Schilling et al., 2010; Zhan et al., 2011; Zhang et al., 2006; Niehoff et al., 2002)。一方面,流域土地利用变化必然导致地表粗糙度发生变化,进而导致地表蒸散发特征发生变化,间接对流域水分循环造成影响 (王黎明等, 2009); 另一方面,土地利用变化,尤其是林地、耕地、草地等土地利用类型变化,在降水过程中,会通过林冠截留、植被拦截降水等方式,对流域水分输入过程造成直接影响 (石培礼和李文华, 2001)。近年来,随着区域水资源短缺问题的日益突出,水资源问题已成为制约我国经济发展的瓶颈因素 (谭少华, 2001), 区域土地利用覆被下的流域水文响应研究已经引起了广大科研人员及行政管理人士的广泛关注,成为当前环境变化下流域水文过程研究的热点问题 (Lørup et al., 1998; Bronstert et al., 2002; Hundecha and Bárdossy, 2004; 亢健, 2010)。

目前,土地覆被变化对流域水文过程的影响主要表现为对水文循环过程和水量变化方面的影响 (Bosch and Hewlett, 1982; Lenat and Crawford 1994; Stednick, 1996; Sahin and Hall, 1996; 邱扬等, 2002; Liu et al., 2008)。研究方法主要包括对比流域实验法、传统数理统计法、模型模拟等方法 (Brown et al., 2005; Wagener, 2007; Franczyk and Changk 2009; Mango et al., 2011; Zhao and Yu, 2013; López-Vicente et al., 2013; Wang et al., 2014)。配

对流域方法虽然能分离降水和土地覆被变化对流域径流的影响,但时间周期长、投资大等特点限制了该方法的应用,且很难找到两个地形、地貌、土壤等立地条件和降水条件较为类似的流域,尤其对于大流域而言,对比试验更难实现(Wei et al., 2008);时间序列分析法需以长序列水文气象数据资料为基础,我国水文站网系统观测起步相对较晚,导致长时间序列水文数据较为缺乏,此外,考虑到时间序列分析法缺乏一定的物理基础,分析计算结果精度较难保证(Zhan et al., 2011);水文模型模拟法因包含的诸多参数缺乏物理意义而不易获得,参数率定对流域实测气象水文数据依赖性较大,诸多水文参数需由实测数据反推,主观性较强。

土地利用变化对流域径流的影响是当前生态水文领域广泛关注的热点问题(Krol et al., 2006; Schlesinger et al., 1990; Covert et al., 2005; Kim et al., 2010; Dung et al., 2012)。土地利用变化对水文过程的影响主要表现在对水文循环过程(水文效应)和水量变化(水资源效应)方面(Bonmann et al., 1999)。土地利用覆被变化通过改变地表粗糙度及地被特征改变流域地表蒸散发等,进而此对流域水量平衡造成影响。由于人类经济活动的影响,坡面上的森林或草地在向农田转化过程中土地覆被变化起着至关重要的作用,它不仅破坏了森林截留和涵养水源的能力,改变了区域水文循环系统,同时还有可能增加下游洪水泛滥的频率和强度(Bronatert et al., 2002; Zhang et al., 2012),以及对水资源的时空分配及水质状况造成影响(Fohrer et al., 2001; 杜习乐等, 2011)。

土地覆被变化对流域水文循环系统的影响从理论上分析主要表现在:降雨初期,除了少部分的降雨直接落入河川径流水面上外,大多数都降落在河道以外,这部分降雨除了满足植物截留、填洼和下渗过程外,还产生地表径流。传统意义上的产流方式可分为两种,即蓄满产流和超渗产流(谢正辉等, 2003)。蓄满产流方式一般发生在气候相对湿润的流域,其潜水位高、土壤包气带薄、下渗强度大,蓄满产流与降雨量的大小密切相关。而超渗产流恰好相反,多发生在气候干旱的流域,其潜水位低、土壤包气带厚、下渗能力弱,超渗产流与降雨量大小关系不大,但降雨强度却决定了产流量的大小。华北土石山区以干旱、半干旱气候为主,大多数区域产流方式为超渗产流,但在某些多雨山区,土壤较薄、植被覆盖度高、下渗能力强,也会发生蓄满产流。

人类活动引发的土地覆被变化及其水文响应研究中,流域尺度林水关系研究是热点与难点,尤其是流域尺度造林工程实施及林木采伐等人类活动对水文的影响研究。目前已有许多学者就土地覆被变化对流域径流量的影响做了大量研究(赵文智, 2002; 金栋梁和刘于伟, 2005; 董国强等, 2013; Pacheco et al., 2013; 刘二佳等, 2013)。但以上诸多研究所选流域气候背景、地形条件及森林结构本身均存在差异性,故所得研究结论大不相同,迄今,在林水关系问题上还存在很大争议(王礼先和张志强, 1998; 高甲荣等, 2001; 陈军锋和李秀彬, 2001; 王根绪等, 2005)。

王根绪等(2005)以甘肃河西走廊马营河流域为研究对象,基于该流域4期土地利用数据,采用数理统计学方法就土地利用变化对流域径流及径流过程各参量的影响进行了深入探讨,结果表明,耕地增加、草地减少使流域年均径流量减少28%,平均贡献率达到78%,说明当地退草还耕工程的实施是造成马营河流域径流减少的主要驱动因素,研究结论可为研究区域土地利用规划提供重要参考;姚治君和管彦平(2003)、张磊和王晓

燕(2010)研究认为土地利用变化是导致潮白河流域径流减少的主导因素; Zhan 等(2011)基于 SWAT 模型研究认为气候变化是海河流域白河支流流域径流减少的主要驱动力等。以上诸多研究分别从流域土地利用类型年际变化、景观格局变化及森林覆被变化等角度分析了土地利用变化对流域径流量的影响, 但研究流域或区域的气候要素及地形、植被因素等均存在差异, 导致所得结论存在显著差异。

1.1.3 流域尺度森林变化的生态水文过程响应

森林占地球陆地表面面积的 33%, 具有良好的水土保持和涵养水源功能。研究森林生态系统涵养水源功能有助于了解森林生态系统中水分的运转过程与机制, 以及其对生态系统结构、生物地球化学循环、能量代谢和生产力的影响, 为流域水资源管理与规划提供参考。

1. 森林数量变化对流域径流的影响

森林作为水文环境要素之一, 对降水输入分配有明显影响(王彦辉等, 1998; 王玉杰等, 2005; 温远光和刘世荣, 1995; 史宇, 2011)。森林植被通过其垂直方向的层次性(冠层、地被物层、根系土壤层)和水平方向的异质性(树种组成等)对流域水分通量各要素产生重要影响(张颖等, 2008; Yu, 1991)。水源地防护林, 尤其是水源涵养林是防护林种之一, 主要是指河川、水库等上游集水区大面积的原始森林、次生林或者人工林。水源涵养林在水土保持、涵养水源、削减洪峰等方面发挥着不可替代的作用。水源涵养林以上诸多功能的发挥是由水源涵养林结构决定的, 森林作为水源保护区主要的土地利用类型, 在多年降水量变化较小及流域森林覆盖率变化不大的情况下, 流域森林自身结构变化势必会对流域水量平衡造成重要影响。诸多学者相继开展了流域尺度森林水文研究(Swank and Crossley, 1988; Yu 1991; McCulloch and Robinson, 1993; 王礼先和张志强, 2001; Sun et al., 2006; Wang et al., 2011; 张远东等, 2011; Chang, 2012), 总结以往研究发现, 因区域气候及立地条件差异等因素影响, 森林对流域产水量的影响还没有形成一致结论, 目前, 大致分为以下三种观点。

1) 森林覆盖率与流域年径流量呈负相关关系

国际上大多数国家的学者对不同流域研究得出的结论认为森林覆盖度提高会使径流量减少, 美国、英国、日本、德国和中国的大多数研究结果都证明了这个结论(Kuczera, 1987; Sun et al., 2006; Wang et al., 2008; Yu et al., 2009; Wang et al., 2011; Zhang et al., 2007a; Zhang et al., 2007b; Huang et al., 2013a; Huang et al., 2013b; Stdenick, 1996)。Hibbert(1983)对世界上 39 个典型流域进行研究后, 得出两条结论: 森林覆盖的减少可增加产水量; 在原来无植被地区种植森林会减少产水量。Bosch 和 Hewlet(1982)选取了世界上 94 个流域, 对植被变化对产水量的影响做了研究, 结果进一步证实了 Hibbert 的结论, 他们还根据不同植被类型对流域产水量的影响进行了研究, 发现产水量随流域植被变化而波动的趋势是可以预测的。总体认为, 流域森林覆盖率增加, 流域产水量减少。我国也有大量研究与此结论相似。刘昌明和钟俊襄(1978)探讨了黄土高原地区森林对流域