

生态水文学研究系列专著

# 人类活动与气候变化的 流域生态水文响应

余新晓 郑江坤 王友生 等/著



科学出版社

生态水文学研究系列专著

# 人类活动与气候变化的 流域生态水文响应

余新晓 郑江坤 王友生 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

以华北土石山区典型流域潮白河流域以及嵌套流域半城子和红门川流域为研究对象,利用多年的水文气象观测资料采用景观生态学测度方法,分析了不同尺度流域土地利用/森林覆被变化过程和水文气候变化趋势,并用分布式水文模型 SWAT 和 WetSpa Extension 模型进行了不同尺度流域水文生态过程模拟,目的在于通过对森林景观结构格局动态变化分析和水文气候变化分析,揭示其基本规律,定量评价森林植被对流域径流各组分的影响,并根据各水文要素的变化趋势定量评估人类活动及气候因子对径流、泥沙、水质变化的贡献率。在此基础上,预测了土地利用和气候变化并揭示了未来潮白河流域水文过程的响应机制。

本书可供从事水文生态学、森林水文学、水土保持学、地理学、环境科学、景观生态学等专业的研究、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

人类活动与气候变化的流域生态水文响应/余新晓等著. —北京:科学出版社, 2013. 6

(生态水文学研究系列专著)

ISBN 978-7-03-037873-6

I. ①人… II. ①余… III. ①人类活动影响-流域-水环境-生态环境-研究-华北地区②气候变化-影响-流域-水环境-生态环境-研究-华北地区 IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 130363 号

责任编辑:朱 丽 杨新改 / 责任校对:刘小梅

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>

**双 青 印 刷 厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:370 000

**定价:78.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 目 录

## 丛书序

## 前言

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....              | 1  |
| 1.1 人类活动和气候变化对水文过程的影响 .....        | 1  |
| 1.1.1 人类活动对水文过程的影响 .....           | 1  |
| 1.1.2 气候变化对水文过程的影响 .....           | 3  |
| 1.1.3 人类活动/气候变化对水文水资源的时空动态影响 ..... | 4  |
| 1.1.4 生态水文研究存在的主要问题及发展趋势 .....     | 6  |
| 1.2 研究区概况 .....                    | 6  |
| 1.2.1 半城子流域概况 .....                | 7  |
| 1.2.2 红门川流域概况 .....                | 9  |
| 1.2.3 土门流域概况 .....                 | 10 |
| 1.2.4 怀河流域概况 .....                 | 11 |
| 1.2.5 密云水库流域概况 .....               | 12 |
| 1.3 研究方法 .....                     | 14 |
| 1.3.1 水文气象数据趋势性分析和突变点检验 .....      | 14 |
| 1.3.2 土地利用/植被动态变化过程 .....          | 18 |
| 1.3.3 模型模拟方法 .....                 | 19 |
| <b>第 2 章 流域景观格局分析</b> .....        | 24 |
| 2.1 流域土地利用/森林覆被动态演变分析 .....        | 24 |
| 2.1.1 流域不同时期土地利用类型构成 .....         | 24 |
| 2.1.2 流域土地利用/森林覆被类型的转化 .....       | 33 |
| 2.2 流域景观格局分析 .....                 | 54 |
| 2.2.1 景观指数的选取 .....                | 54 |
| 2.2.2 景观级别上的景观格局动态变化分析 .....       | 55 |
| 2.2.3 斑块级别上的景观格局动态变化分析 .....       | 56 |
| 2.3 流域未来土地利用变化预测 .....             | 63 |
| 2.3.1 土地利用变化预测方法 .....             | 63 |
| 2.3.2 土地利用变化预测结果 .....             | 65 |
| <b>第 3 章 流域气候因子变化分析</b> .....      | 67 |
| 3.1 流域降水趋势性变化及突变点检验 .....          | 67 |
| 3.1.1 潮白河流域降水趋势性变化及突变点检验 .....     | 67 |
| 3.1.2 半城子流域降水趋势性变化及突变点检验 .....     | 71 |

|            |                                 |            |
|------------|---------------------------------|------------|
| 3.1.3      | 红门川流域降水趋势性变化及突变点检验              | 76         |
| 3.2        | 流域气温趋势性变化及突变点检验                 | 81         |
| 3.2.1      | 气温年内变化规律                        | 81         |
| 3.2.2      | 气温年际变化规律                        | 82         |
| 3.2.3      | 气温突变检测                          | 83         |
| 3.3        | 流域潜在蒸散发趋势性变化及突变点检验              | 84         |
| 3.3.1      | 潜在蒸散发年内变化规律                     | 85         |
| 3.3.2      | 潜在蒸散发年际变化规律                     | 85         |
| 3.3.3      | 潜在蒸散发突变检测                       | 86         |
| 3.4        | 气候因子预测                          | 86         |
| <b>第4章</b> | <b>气候变化和土地利用/森林覆被变化对水文过程的影响</b> | <b>88</b>  |
| 4.1        | 水文过程趋势性变化及突变分析                  | 88         |
| 4.1.1      | 潮白河流域水文过程趋势性变化及突变分析             | 88         |
| 4.1.2      | 半城子流域水文过程趋势性变化及突变分析             | 95         |
| 4.1.3      | 红门川流域水文过程趋势性变化及突变分析             | 100        |
| 4.2        | 水文过程对气候变化和土地利用/森林覆被变化的响应        | 103        |
| 4.2.1      | 潮白河流域气候变化和土地利用的水文响应             | 103        |
| 4.2.2      | 半城子流域土地利用/森林覆被变化的水文响应           | 125        |
| 4.2.3      | 红门川流域土地利用/森林覆被变化的水文响应           | 131        |
| <b>第5章</b> | <b>大尺度流域生态水文过程模拟分析</b>          | <b>137</b> |
| 5.1        | SWAT 数据库的建立                     | 137        |
| 5.1.1      | 基于 GIS 建立流域数字高程模型               | 138        |
| 5.1.2      | 土地利用/覆被变化数据库                    | 138        |
| 5.1.3      | 土壤数据库                           | 140        |
| 5.1.4      | 属性数据库                           | 142        |
| 5.2        | 基于 DEM 的水文参数的提取                 | 147        |
| 5.2.1      | 流域河网生成                          | 147        |
| 5.2.2      | 子流域划分                           | 147        |
| 5.2.3      | 水文响应单元划分                        | 147        |
| 5.3        | 参数灵敏度分析                         | 160        |
| 5.3.1      | 方法简介                            | 161        |
| 5.3.2      | 结果分析                            | 161        |
| 5.4        | 参数率定及校核验证                       | 165        |
| 5.4.1      | 参数适用性评价方法                       | 165        |
| 5.4.2      | 流域水文校核期参数率定                     | 165        |
| 5.4.3      | 应用 SWAT 进行模型模拟                  | 166        |
| 5.5        | 径流泥沙变化成因分析                      | 177        |
| 5.5.1      | 沟道库坝工程对潮白河流域径流的影响评价             | 177        |

|              |                                          |            |
|--------------|------------------------------------------|------------|
| 5.5.2        | 沟道库坝工程对潮白河流域泥沙的影响评价 .....                | 181        |
| 5.5.3        | 土地利用对潮白河径流变化的贡献率 .....                   | 185        |
| 5.5.4        | 土地利用对潮白河泥沙变化的贡献率 .....                   | 186        |
| 5.5.5        | 20 世纪 80 年代人类活动/气候变化对潮白河流域径流泥沙的贡献率 ..... | 188        |
| <b>第 6 章</b> | <b>小尺度流域生态水文过程模拟分析 .....</b>             | <b>189</b> |
| 6.1          | WetSpa Extension 模型数据库的建立 .....          | 190        |
| 6.1.1        | 基于地理信息系统建立的流域 DEM .....                  | 190        |
| 6.1.2        | 土壤数据库 .....                              | 192        |
| 6.1.3        | 土地利用/覆被变化数据库 .....                       | 193        |
| 6.1.4        | 气象和水文数据库 .....                           | 195        |
| 6.2          | 空间分布参数的提取 .....                          | 196        |
| 6.2.1        | 基于 DEM 的河网提取及子流域划分 .....                 | 196        |
| 6.2.2        | 基于土壤类型的空间分布参数提取 .....                    | 196        |
| 6.2.3        | 基于土地利用类型的空间分布参数提取 .....                  | 198        |
| 6.2.4        | 产流系数和洼蓄容量的空间分布 .....                     | 199        |
| 6.2.5        | 汇流参数的提取 .....                            | 199        |
| 6.3          | WetSpa Extension 模型的参数率定与验证 .....        | 201        |
| 6.3.1        | WetSpa Extension 模型模拟效果的评价标准 .....       | 201        |
| 6.3.2        | 流域水文参数率定结果 .....                         | 201        |
| 6.3.3        | 模型径流模拟与验证的结果分析 .....                     | 203        |
| 6.4          | WetSpa Extension 模型与数字滤波法基流分割结果比较 .....  | 212        |
| 6.4.1        | 数字滤波法的介绍 .....                           | 212        |
| 6.4.2        | 数字滤波法进行流域径流分割 .....                      | 213        |
| 6.4.3        | 两种径流分割结果对比 .....                         | 214        |
| 6.5          | 森林植被变化对径流组分的影响 .....                     | 215        |
| 6.5.1        | 流域不同径流组分的变化 .....                        | 215        |
| 6.5.2        | 流域森林植被变化对径流组分的影响 .....                   | 216        |
| <b>第 7 章</b> | <b>流域水文情景模拟 .....</b>                    | <b>222</b> |
| 7.1          | 潮白河流域水文情景模拟 .....                        | 222        |
| 7.1.1        | 景观格局情景建立 .....                           | 222        |
| 7.1.2        | 气候情景建立 .....                             | 224        |
| 7.2          | 半城子和红门川流域水文情景模拟 .....                    | 227        |
| 7.2.1        | 流域土地利用/森林覆被变化的情景设置 .....                 | 227        |
| 7.2.2        | 流域不同土地利用结构的水文响应 .....                    | 228        |
| 7.2.3        | 流域不同情景森林植被类型的水文响应 .....                  | 232        |
| 7.2.4        | 流域不同情景森林覆被率的水文响应 .....                   | 239        |
| <b>参考文献</b>  | <b>.....</b>                             | <b>241</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 人类活动和气候变化对水文过程的影响

### 1.1.1 人类活动对水文过程的影响

本书所涉及的人类活动是指除气候变化外影响水文过程的各种要素,主要包括各土地利用类型面积转移和调整,沟道库坝工程以及其他社会经济因素。由于植被的砍伐和破坏,降低了集水区的水源涵养能力,导致水土流失、河沙遽增,不仅增加了洪峰流量,而且造成了河床淤积。沟道库坝工程是人类为了持续利用水资源在河道上修建的拦截工程,但太多库坝工程的修建造成了下游来水量急剧减少,不仅破坏了河流生态系统,而且使得上下游矛盾加剧。移动土石是人类活动中很重要的一环,修路、采矿、建筑、运河、开隧道、兴建都市、开发能源等各种活动都需要搬动大量土石,从而导致大量水土流失。

#### 1. 土地利用变化驱动力分析及预测

生态环境和社会经济过程的相互作用是导致土地利用/覆盖格局时空变化的根本动力。马尔可夫(Markov)模型在土地利用变化建模中有广泛应用。郑江坤等(2010a, 2010b)利用时空马尔可夫模型分别对潮白河流域各土地利用类型和林地类型进行了预测。但传统马尔可夫模型难以预测土地利用的空间格局变化,而元胞自动机(CA)模型则具有强大的空间运算能力,可以有效地模拟系统的空间变化,并取得了很好的研究成果(侯西勇等,2004)。单纯的元胞自动机模型主要着眼于元胞的局部相互作用,因此存在明显的局限性。CA-Markov 模型综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势,既提高了土地利用类型转化的预测精度,又可以有效地模拟土地利用格局的空间变化,具有较好的科学性与实用性。土地利用变化驱动力分析一直是相关研究的难点和热点。余新晓等(2009)指出自然和社会经济因素共同驱动黄土高原典型流域土地利用转变;夏兵(2009)采用主成分分析方法对怀柔水库流域和潮白河流域的土地利用驱动因子进行了筛选,得出国民生产总量和用电总量与土地利用变化的相关性较大;王彦阁(2010)研究了密云水库流域土地利用的时空变化,指出国家宏观政策是土地利用变化的主要驱动力。土地利用受到国家政策、人类活动、自然灾害、气候变化等多重影响,其复杂性和难预测性明显,因此对其驱动力分析及预测须进行深入探讨。

#### 2. 土地利用/覆被变化对水文过程的影响

在中国,退耕还林和坡改梯工程被认为是使流域上游径流减少的主要驱动力(Sun et al., 2006)。一些学者利用统计对比的方法研究了土地利用方式与结构和水文过程之间的联系,岳隽等(2006)应用统计分析和空间分析方法论证了深圳市内 5 个流域土地利

用类型与河流水质关键指标间的相关关系。而很多学者则采用模拟手段评估土地覆被变化对流域水文过程的影响, Juana Paul Moiwo 等利用 WetSpaas(water and energy transfer between soil, plants and atmosphere under quasi-steady state)模型对吉林省西部半干旱湿地生态系统径流、蒸散发的土地利用变化响应进行了分析;高超等依托德国波茨坦气候影响研究所(the Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK) HBV-D 模型建立了巢湖流域降水-径流关系, 分析了流域土地覆被变化对径流量影响;杜丽娟等(2010)将分布式水文模型 SWAT(soil and water assessment tool)应用于水土保持生态补偿标准的核算中, 模拟了 2 种情景下的水土保持林草措施涵养水源和保持土壤量, 然后引入效益分摊系数计算不同情景下潘家口水库对上游地区的补偿标准;于国强等(2010)利用野外模拟降雨试验, 提出植被对水沙调控作用从大到小依次为植物根系、整个坡面植被、坡面下部植被和坡面上部植被;以上研究大多注重土地利用/覆被变化对水文过程的单向作用, 而对两者之间的耦合反馈机制分析较少。自然界是复杂的, 因此对要素间的相互作用的研究对探索自然科学规律具有重要意义。

### 3. 水库、坝系及其沟道工程对水文过程的影响

随着经济、社会发展, 在河流上大规模筑坝拦截河流量(发电、灌溉、控制洪水等)是河流生态环境受人为影响最显著、最广泛、最严重的事件之一。鉴于水坝拦截造成河流、区域生态环境的改变, 使它成为目前河流生态研究的重要领域之一。水电站或水库、农业灌溉引水、城市取用水等水资源管理措施对河道水量过程影响非常敏感, 不仅增加了水资源管理的复杂性, 而且给水文模拟带来了很大的不确定性。

我国在沟道综合治理措施配置时, 是从上游到下游, 从沟头到沟口, 从支沟到主沟, 从沟岸到沟底层层设防, 分类施治。通过削、垫、筑、淤等改造措施消除破烂沟坡、陷穴暗洞和活动塌方。修筑的沟边、沟头防护埂, 蓄水池, 小水库, 淤地坝, 排洪渠等形成了拦、蓄、排相结合的沟道防治体系。沟道里修建淤地坝, 可以拦、蓄来自坝控小流域内坡沟系统的径流泥沙, 并实现对其调控作用。在蓄滞型水土保持沟道工程作用强的地区, 水向土壤中的下渗能力要比非作用区高得多, 更易于使地表径流向壤中流和地下径流转化, 产流形式有从超渗产流向蓄满产流转变的趋势(丁琳霞, 1999);方学敏等(1998)探讨了淤地坝的淤积形态和拦沙机理, 从单坝拦沙定额、小流域对比分析、河流泥沙变化、典型暴雨洪水等方面讨论了淤地坝的拦沙作用;冉大川等对黄河中游黄土高原地区不同尺度水保坡面措施减轻沟蚀的作用进行了定量研究, 得出黄河中游黄土高原地区流域水保坡面措施减轻沟蚀的作用大于坡面措施本身的减沙作用;张利平等(2010)研究提出未来气候变化对南水北调中线工程水源区径流变化影响不大, 总体来看有利于南水北调中线工程的调水;目前大多数研究均停留在定性描述上, 而对库坝影响的过程模拟的研究则较少, 如何有效地模拟这些水资源管理措施对水文过程的影响是水文模型亟待加强的环节(徐宗学和程磊, 2010)。

### 4. 社会经济因素对水文过程的影响

水资源作为国民经济发展的先导资源, 制约和影响区域社会经济的可持续发展。城

市化建设作为经济发展的主要形式,通过加剧下垫面变化强烈影响水资源的数量和质量(徐光来等,2010)。工农业发展通过引水调水工程和地下水开采改变水资源的赋存状态,从而影响水文水质过程,不同学者在不同区域内对其进行了研究。国内各学者就解决水量和水质问题展开了讨论。李浩等(2010)以区域利益为视角,运用经济学理论提出了跨界水资源冲突的主要动因并基于博弈理论,分三个阶段、五个步骤开展了跨界水资源冲突协调和解决的研究;根据水资源的自然条件和开发利用现状,水资源的开源潜力已经很小,且外流域大规模调水投资多、风险大、工程规划期和施工期长;因此,依靠科技,科学调配和系统管理水资源,建立节水型的生产体系,建立与水资源承载力相应的产业结构布局是迎接水资源危机挑战的主要对策之一。

### 1.1.2 气候变化对水文过程的影响

气候变化是导致生态系统、社会经济和人类福祉发生变化的重要驱动力之一,目前,它已经成为学术界、决策界和普通民众共同关注的焦点问题之一。按照世界气象组织(WMO)的意见,完整的气候系统应包括五个物理组分:大气圈、水圈、冰雪圈、陆地表面和生物圈。驱动全球气候系统的基本过程是在太阳辐射对地-气系统的加热和地面、大气层向太空发射长波辐射的冷却的共同作用下,低纬度获得的热量多,高纬度获得的热量少,从而形成纬度间的温度梯度;同时,由于海陆的热容量不同,形成了海陆之间的温度梯度。纬度间和海陆间的温度梯度推动了大气环流,大气环流形成了风系。海洋受盛行风、地球自转作用、海岸和岛屿的分布和形状、海水密度分布不均等的影响,形成了海洋环流。大气环流和海洋环流把热量从高温地区输到低温地区,使各地区间的热量处于动态平衡状态,如偏离平衡状态将使气候发生变化。

#### 1. 气候变化及预测

目前人类最为关心的是十到百年尺度上的全球变化,因为它与当前人类社会面临的问题和如何发展关系最密切。但人们还不能完全清晰地描述十到百年尺度上全球变化过程。就目前的认识水平来说,驱动全球气候系统变化的主要过程有大气化学成分的控制和调节(温室气体)、平流层过程(臭氧)、海洋物理过程、海洋生物化学过程(吸收碳)、陆面过程、生态系统和水的多种作用。

气候预测是研究的难点和热点。根据预测的时间长度和准确程度,预测问题大致可分为三种情况:①预报。主要是指1~3天的短期和4~7天的中期天气预报,以及月、季、年际长期气候预报。②预测。预测时间长度在几十年到上百年以上,如人类活动对气候变化和生态环境变化的影响预测问题,在预测中对未来假设了诸多可能发生的条件,又称气候情景。③趋势分析和统计预报。在过去和现在预测资料分析的基础上进行综合,找出规律性的东西,并以此为基础,采用统计方法推测未来可能出现的情景,推断可能的变化趋势和方向。

国内各学者根据不同的方法对国家或区域未来的气候进行了预测。姜大膀等(2004)在SRES A2温室气体和气溶胶排放情景下对中国大陆21世纪前30年的10年际气候变化趋势进行了研究,结果表明:大陆冬季和夏季表面温度、表面最高温度和最低温度分别

升高  $0.3 \sim 2.3^{\circ}\text{C}$ 、 $0.1 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 、 $0.5 \sim 2.7^{\circ}\text{C}$ ，增幅大体上呈现东西向带状分布，由南至北升温逐渐加强，且增幅随时间加大；气候变化国家评估报告编写委员会(2007)预测中国华北地区的气温将出现较大幅度的增温现象，在 A2 和 B2 的排放情景下，到 21 世纪 20 年代时温度分别增加  $1.0^{\circ}\text{C}$  和  $1.2^{\circ}\text{C}$ ；而降水则显得异常复杂，从长期发展看，华北地区降水总体增加，但在 21 世纪前 20 年降水将减少。徐影等(2004)利用政府间气候变化专门委员会(IPCC)数据分发中心提供的 7 个模式，模拟了在人类活动影响、温室气体(GG)增加，以及温室气体和硫化物气溶胶(GS)共同增加时，长江中下游地区 21 世纪的未来温度变化与全球和全国一样，都将呈增加的趋势。

## 2. 气候变化对水文过程的影响

近百年来全球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化。气候变化必然引起水分循环变化，并引起水资源在时空上的重新分布和水资源总量的改变，进而影响生态环境与社会经济的发展。深入研究气候变化背景下水文水资源系统的变化规律，揭示气候变化与水文水资源以及生态环境变化之间的关系，分析水循环演变特征，评估未来气候变化对流域水文与水资源的影响，可为未来水资源系统的规划设计、开发利用和运行管理提供科学依据。

赵付竹等利用水量平衡水文模型分析了澜沧江跨境径流对气候变化的敏感性，得出跨境径流量对降水变化的响应敏感，对气温变化的响应相对较弱；袁飞等(2005)耦合 VIC (variable infiltration capacity) 模型和 PRECIS (providing regional climate for impacts studies) 模型预测了海河流域，得出即使海河流域降水量增加，未来水资源仍将短缺，且汛期发生洪水的可能性将加大。陈亚宁等(2009)对新疆 8 条河流地表径流、气温和降水进行了分析，得出气候变暖已对区域水文循环产生了重要影响；姚允龙等(2010)利用水量平衡法和降水-径流经验模型得出近 50 年内挠力河年径流量的变化大约 40% 是由气候变化引起的。

不同地域或不同气候情景设置对水文要素影响均会产生很大差异，张世法等(2010)提出多种气候模式模拟结果与实测值之间，以及不同模式模拟结果之间，不仅定量方面差异很大，而且在定性方面甚至出现相悖的结果，不确定性十分显著。气候变化对河川年径流影响的不确定性，包括不同气候模式模拟结果的不确定性、温室气体排放情景的不确定性、尺度转换中的不确定性、洪水和年径流计算模型结构和参数的不确定性等(张建云和王国庆，2007)。在全球气候变化下，合理预测未来气候变化趋势并采用有效的模拟方法对水文因子模拟和预测已成为研究的热点和难点。

### 1.1.3 人类活动/气候变化对水文水资源的时空动态影响

水文水资源已从以研究陆地水循环过程为核心的地表水文学、土壤水动力学、地下水动力学以及为生产实践服务的工程水文学逐渐发展成为综合研究水分、能量与物质(泥沙、二氧化碳以及营养物质等)耦合循环及陆面与大气相互作用、水文过程与生态过程相互作用等综合性、交叉性研究。

### 1. 时空尺度转化问题

尺度问题存在于土地利用、气候气象、水文要素、坝系工程、人为活动等多方面,不同时空尺度之间的转化在综合研究水文水资源上显得尤为重要。Dooge(1986)定义的水文研究范围的空间尺度是从水分子团( $10^{-8}\text{m}$ )到整个星球范围( $10^7\text{m}$ ),相应的时间尺度范围是从 $10^{-13}$ 秒到 $10^9$ 年。Blöschl 等(1995)将水文尺度划分为过程尺度、观测尺度和模拟尺度3种。其中,过程尺度可以用水文过程的时空幅度、发生周期和相关长度来衡量。观测尺度和模拟尺度则根据研究条件主观选定。观测尺度包括测量的时空幅度、取样的解析度和样本的大小。这是由过程尺度的客观性决定的,水文过程只有在特定的尺度范围内才会有所表现,要求选择与其相称的观测和模拟尺度。

土地利用在不同尺度上具有不同的特征,包括不同的影响因素、不同的演变机理与过程(Holling,1992)。某个研究尺度上的影响因子可能在其他尺度上并不发生作用,也就是影响因子的尺度效应。国外很多学者通过分析多种分辨率下土地利用和影响因子的关系统计得出尺度之间的关系(Veldkamp and Fresco,1997)。邱炳文通过构建不同聚合规模上的土地利用空间分布驱动模型,探讨了福建省龙海市土地利用空间分布影响因子的尺度规模效应;黄万里等通过类型转换、同类图斑合并、小图斑取舍与处理、数据简化与拓扑关系维护的处理流程,在一定程度上解决了土地利用类型数据的尺度上推问题;赵文武等(2006)分别对坡面尺度、小流域/流域尺度和区域尺度上土地利用对土壤侵蚀的影响及相应尺度上的模型进行了阐述。

尽管国内外对尺度转化开展了多方面的研究,但由于自然界事物变化规律具有随机性和复杂性特点,其相关研究有待进一步深化。

### 2. 多模型耦合技术在水文过程模拟方面的应用

现代水文水资源研究正由传统“还原细化”研究向综合交叉方向发展,并由传统基于单个水文环节的研究过渡到基于二元水循环过程的研究上来,原型观测与数学模拟的结合已成为其关键研究手段(王浩等,2010);但多尺度、多因素下生态水文响应机制一直是研究的难点和重点,国内外很多学者在这方面都进行了积极地探索。

Li 等(2009)利用 Zhang 模型定量评估了中国无定河流域气候变化和人类活动对径流的影响;刘吉峰等(2008)耦合全球气候模式、青海湖流域统计降尺度模式、SWAT 水文模型及湖泊水量平衡模型模拟了青海湖近几十年水位变化过程,预估了未来30年青海湖湖泊水文变化情景;Pyzoha 等(2008)基于地表水、地下水埋深、降雨和温度数据建立了一个模拟丰枯时期水文变化的概念模型;张建云(2010)深入分析了高强度人类活动引起的下垫面变化和以全球变暖为主要特征的气候变化对流域产流和汇流机制的影响;秦伟等(2010)利用双累积曲线法、径流输沙系数还原法和统计系列对比法计算了生态建设实现减水、减沙效应贡献率分别约为31%和65%。

人类活动通过改变大气中的化学组成和土地利用方式影响气候系统,而两者又是交互影响河流水沙变化的因素,其中气候因素包括流域降雨量和蒸散发变化;人类活动因素包括水土保持措施、水库工程、流域调水调沙及引水引沙、河道采砂等(胡春宏等,2010)。

Guo 等(2008)研究表明气候因素是影响年径流变化的主导因子,而土地利用变化对年径流影响较小,但对季节径流影响较为显著。同时,不同管理措施对径流的影响也较大。

#### 1.1.4 生态水文研究存在的主要问题及发展趋势

生态水文学从诞生以来发展非常迅速,世界各国学者都先后对其进行了不同方面的研究。研究范围从单株植被发展到星球尺度,同时研究方法也从实验分析发展到经验模型、半分布式模型和分布式模型。

经验模型或定性分析尽管在解决水文过程变化机理上无明显优势,但其简单有效的表达和极少的参数在阐述结论时能使人信服,故而它至今仍被很多学者采用。Garbrecht 和 Starks(2009)分别对 Oklahoma 流域中西部水土保持措施实施前后建立输沙-径流经验模型,对水土保持措施对输沙的长期影响进行了定量评价。Michaelides 等(2009)采用树状回归分析方法对美国新墨西哥州的 Jornada 区域各植被类型对径流泥沙的影响进行了评价,得出控制径流和泥沙的主要因素是灌丛类型和林冠盖度。

随着计算机技术和空间技术的发展,水文模型已从传统的经验模型发展到半分布式水文模型和分布式水文模型,水文过程的描述也从传统的定性分析发展到定量和机理分析。水文循环过程模拟的详细程度依赖于数据的收集和应用情况,另外,采用不同的水文模型模拟的结果也不尽相同。

分布式水文模型考虑了水文变化过程的物理机制和各环境因素的响应,故而涉及参数较多,但很多参数很难获取或不能直接获取,需要通过在适当范围内调整参数使模型的模拟结果更加接近实际结果。调参的方法主要包括手动调参和自动调参。由于模拟流域下垫面往往较为复杂,考虑到空间异质性问题,故而在参数校准阶段存在调参的随意性和盲目性特点,即使校准结果较好,往往在验证阶段或其他流域的模拟效果不够理想,尺度转化和异参同效是分布式水文模型目前存在的症结。国内外很多学者针对相关问题展开了大量讨论。

尽管不同学者在不同时空尺度上对水文过程变化机理进行了合理的模拟和阐述,但研究均局限于某一方面,对不同尺度间的联系和尺度转化问题有待进一步深化。同时,各种水文模型所依据的理论基础和模拟公式差异较大,如何整合和评价各种模型是以后发展的一个重要方向。揭示大自然水文变化的神秘面纱是世界水文学者们孜孜以求的目标,水文过程涉及气态水、液态水和固态水三个方面,三者之间互相转化异常复杂,且表现出明显的区域性和时节性,仅依靠一个国家或几个水文学家很难揭示其中的奥妙,因此集结全世界各层次水文学家和生态学家智慧,搭建水文研究世界平台,形成点线面立体网络研究体系是生态水文研究发展的整体趋势,同时计算机和信息科学的发展也为实现这个目标提供了技术支撑。通过全世界水文学者和生态学者的共同努力,相信生态水文的研究一定能够得到长足的发展。

## 1.2 研究区概况

潮白河流域位于华北平原北部,东经  $115^{\circ}25'$ ~ $117^{\circ}45'$ ,北纬  $39^{\circ}10'$ ~ $41^{\circ}40'$ 。潮白

河是海河流域北系四大河流之一,发源于燕山北部山区,流经河北、北京、天津三个省市,在天津的北塘与永定新河汇流注入渤海。全部流域面积 1.9 万多平方公里,其中山区面积  $16\,810\text{km}^2$ ,平原  $2544\text{km}^2$ ,山区面积占全流域 87%。潮白河上游分潮河、白河两大支流,潮河发源于河北省丰宁满族自治县,在密云县古北口镇入北京境内;白河发源于河北省沽源县,在延庆县白河堡入北京境内;潮、白两河在密云水库汇合之后,形成下游的潮白河。

本书内容主要以潮白河流域内的半城子流域、红门川流域、土门流域、怀河流域和密云水库流域为研究对象。

### 1.2.1 半城子流域概况

#### 1. 流域位置

半城子流域位于牐牛河流域的上游,在密云水库的北面,距离密云县城 32.6km,属于密云水库保护区的二级保护区。此流域在东经  $116^{\circ}55' \sim 117^{\circ}2'$ ,北纬  $40^{\circ}37' \sim 40^{\circ}43'$ ,具体位置见图 1-1。该流域均为山地,土地面积为  $66.18\text{km}^2$ ,流域有半城子水库,总库容 1020 万  $\text{m}^3$ ,流域出口站控制着牐牛河上游  $66.1\text{km}^2$  的面积。

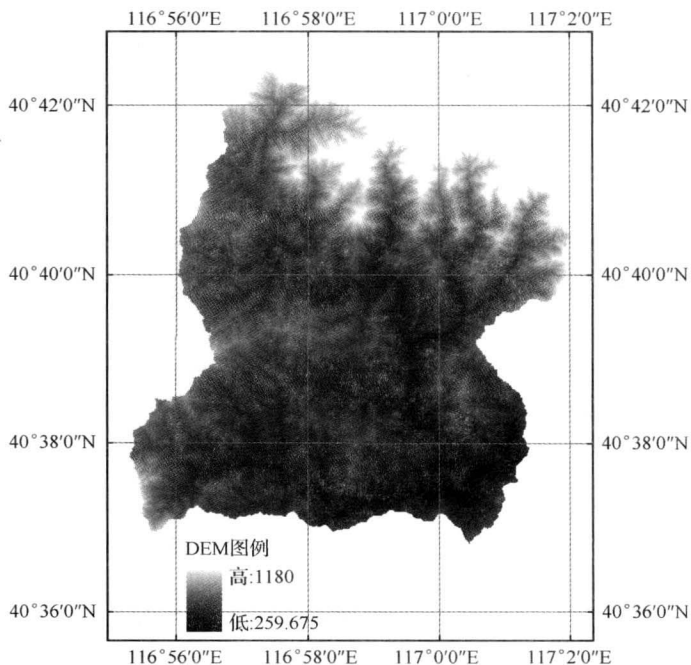


图 1-1 半城子流域位置地形图

#### 2. 地质地貌

半城子流域位于华北平原和蒙古高原的过渡地带。流域地处山区,地貌类型复杂多

变,总体属于燕山山脉的一小部分。流域境内山峦起伏,海拔在 250~1200m 之间。通过海拔可以分为相对高度在 300m 以下的丘陵,海拔在 350~800m 之间的低山,以及海拔在 800~1000m 之间及以上的中山地带。流域山体的起伏变化比较大,各山体的平均坡度在 25°~30°之间。

### 3. 气候条件

半城子流域属于暖温带半湿润大陆性季风气候。流域因地形地貌的相对高差变化,气候表现出垂直变化,在海拔 800m 以上大多数山地属于温带半湿润和半干旱大陆性季风气候,而海拔 700~800m 以下属于暖温带的半湿润大陆性季风气候。由于受地形影响,流域盛行东北风和西南风。流域多年平均气温为 10.5℃,年日照总数为 2801.8h,年内无霜期为 176d,多年平均降雨量为 669mm,且主要集中在 6~8 月,占全年降水量的 75%以上(孙庆艳,2008)。

### 4. 土壤

流域土壤类型主要取决于成土环境和成土母质,由于受不同气候水分条件和地形地貌等的影响,流域的土壤类型主要有褐土和山地棕壤,同时也有极少数石质土。土壤的 pH 为微酸性或者中性,土层厚度为在 10~30cm 之间。土壤随海拔由高到低表现出明显的垂直分布规律,山地棕壤分布在海拔 900m 左右及以上,下部与褐土相连,依次为淋溶褐土、普通褐土和潮褐土。

### 5. 植被类型

半城子流域林种以水源涵养林为主,天然植被类型有暖温带落叶阔叶林和针叶林。目前生长的针叶林主要有油松(*Pinus tabulaeformis*),还有部分侧柏[*Platycladus orientalis*(Linn.) Franco]等,阔叶林有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)等,还有一些荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等灌丛生长。侧柏林、油松林以及刺槐林等是流域的主要植被类型。

### 6. 水文

该流域位于密云水库北部的牐牛河流域上游,牐牛河属于潮河的一条支流。流域水库于 1975 年 11 月动工,1976 年 7 月大坝落成,是一座以防洪、灌溉为主的中型水库。流域水文站控制牐牛河上游 66.1km<sup>2</sup>,流域所建水库的总库容为 1020 万 m<sup>3</sup>。在坝下建有电站一座,年均供水达到 450 万 m<sup>3</sup>,年均发电达到 30 多万千瓦时,灌溉农田 2 万亩\*。流域平均降雨量为 669mm,流域沟道径流以地表径流为主,平均径流量为 1289 万 m<sup>3</sup>。干流河道长 19.9km,平均纵坡 16.6%,河谷地带地形陡峻,易发生滑坡和泥石流。沟道多为季节性洪沟,旱季无径流,雨季经常暴发山洪。

\* 亩为非法定单位,1 亩≈666.7m<sup>2</sup>。

## 7. 半城子流域社会经济状况

半城子流域行政隶属北京市密云县,包括不老屯、冯家峪和高岭 3 个乡镇的 12 个行政村。流域拥有 324 户,户籍人口为 1000 人,拥有劳动能力的人数仅为 420 人,大多数家庭的经济来源是劳动力外出打工,其中打工人数占到总人数的 60%左右,大多数农民都参与一些与农业无关的工作;留在乡镇的剩余劳动力从事种植苹果、耕作农田、养殖畜牧等方面的劳动。半城子流域完全适宜种植的面积仅为  $24\text{hm}^2$ ,由于国家实施的退耕还林政策,使流域林地面积逐渐增多。2004 年流域林果产品和粮食产量分别为 25.3 万公斤和 13.9 万公斤,流域人均收入在 1300 元左右。

### 1.2.2 红门川流域概况

#### 1. 位置

红门川流域地处北京市密云县的东部,位于北京山区东北部;与密云县城的距离为 20km。红门川流域的主要河流起源于河北省兴隆县黄门子村,名为红门川河,在密云县龙潭岭入境。此流域在东经  $117^{\circ}2' \sim 117^{\circ}16'$ ,北纬  $40^{\circ}20' \sim 40^{\circ}28'$ ,具体位置见图 1-2。该流域均为山地。流域中有沙厂水库,位于密云县红门川河下游沙厂村东,于 1973 年 5 月竣工,总库容 2120 万  $\text{m}^3$ ,流域出口站控制着牐牛河上游  $128\text{km}^2$  的面积。

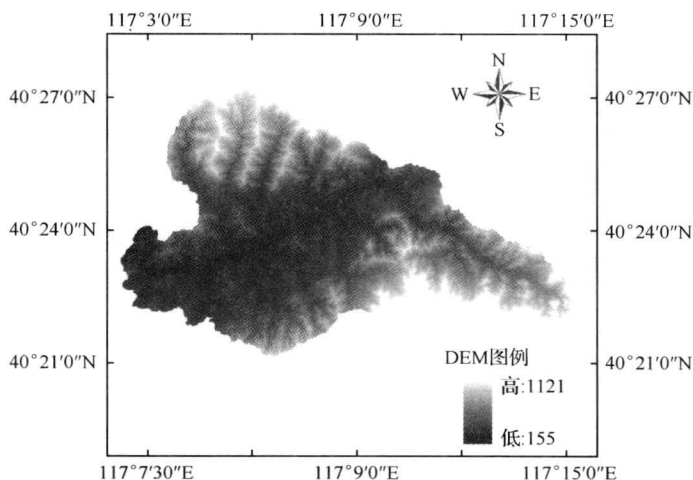


图 1-2 红门川流域位置地形图

#### 2. 地质地貌

红门川流域同样处于华北平原和蒙古高原的过渡地带,地貌类型复杂多变,总体属于燕山山脉的一小部分。流域境内山峦起伏,海拔在 155~1121m。通过海拔可以分为相对高度在 300m 以下的丘陵,海拔在 350~800m 的低山,以及海拔在 800~1100m 及以上的中山地带。流域山体的起伏变化比较大,各山体的平均坡度在  $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。红门川流域地

质结构和半城子流域类似,主要为碳酸岩和花岗岩等基岩组成,这些岩石容易造成物理风化而形成砂质堆积物,砂质堆积物一般为粗骨土,沟谷中主要是砂质冲积物。

### 3. 气候条件

红门川流域同样具有北京地区气候特征,阳光比较充足、降水集中、四季分明和季风明显等,尤其冬季干燥寒冷风大。流域因地形地貌的相对高差变化,气候表现出垂直变化,在海拔 800m 以上大多数山地属于温带半湿润和半干旱大陆性季风气候,而海拔 700~800m 以下属于暖温带的半湿润大陆性季风气候区。由于受地形影响,气温随海拔的升高而降低,年积温也随海拔呈减小趋势。

### 4. 土壤

红门川流域土壤类型主要为褐土和山地棕壤。土壤随海拔由高到低表现出明显的垂直分布规律,在海拔 900m 以下主要分布的为棕壤,而在 900m 以上以褐土为主,流域的褐土又分为三个亚类,分别为普通褐土、潮褐土和淋溶褐土。流域土壤的 pH 为微酸性,取值范围为 5.5~6.5,而且有机质含量也在百分之五以上。

### 5. 植被

天然植被以中旱生、旱生的多年生草本和多年生灌木为主,灌木多为湿性落叶灌木,大多数植被高度均在 1m 以上。人工林种以水源涵养林为主,因此侧柏林、油松林以及刺槐林等是流域主要的植被类型。目前生长的针叶林有云杉(*Picea asperata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和侧柏[*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco]等,阔叶林有蒙古栎(*Quercus mongolica*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)等,还有一些山杨(*Populus davidiana*)和荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等灌丛生长。除天然林外,人工种植了一些板栗(*Castanea mollissima*)和苹果(*Malus domestica*)等。

### 6. 社会经济情况

红门川流域隶属于北京市密云县,包括巨各庄、大成子、北庄、太师屯、白龙潭、镇罗营 6 个乡镇。截至 2006 年,流域共有 34 157 户,户籍人口为 72 822 人,农业户和非农业户分别为 25 696 户和 8461 户,大多数家庭的经济来源是劳动力外出打工,其中打工人数占总人数的 40%左右,都从事一些与农业无关的事业;剩余的劳动力主要从事种植业和畜牧业等方面的劳动。

## 1.2.3 土门流域概况

### 1. 自然地理条件

土门流域位于北京市密云县北庄镇土门行政村,处于东经  $117^{\circ}7' \sim 117^{\circ}9'$ ,北纬  $40^{\circ}28' \sim 40^{\circ}30'$ ,海拔在 245~725m,面积为 3.35km<sup>2</sup>,属华北平原北部燕山山脉前脸的小

型山环地区(图 1-3)。土壤以山地淋溶褐土(酸性盐类淋溶褐土)为主,坡地土质为壤质和石砾质,沟谷阶地则为壤质和砂质土,土壤肥力较差。坡地土层厚度一般较薄,多为 20~30cm,但土层以下强风化岩层较厚。气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 10.5℃,年均降水量 669mm,主要集中在 6~9 月份,多为暴雨,雨热同期(胡淑萍, 2008)。

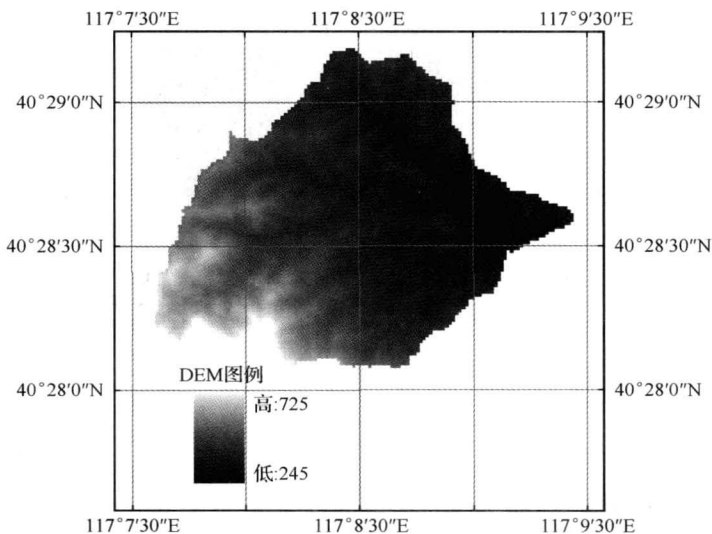


图 1-3 土门流域位置地形图

## 2. 森林资源概况

海拔 500m 以上阴坡基本为阔叶次生林、乔灌混交林、草灌坡地。阳坡则多为侧柏、灌木疏林地、草灌地。海拔 500m 以下的地带分布有人工油松林、侧柏、刺槐、山杏、板栗等。流域内林地共有 304.4hm<sup>2</sup>,占流域总面积的 90.87%;防护林 191hm<sup>2</sup>,占流域的 57.02%;经济林 113.4hm<sup>2</sup>,占 33.85%(胡淑萍,2008)。

## 3. 社会经济情况

2004 年该流域有 123 户 324 人,总收入 186 万元,人均年收入 5740 元。其中林业收入 86 万元,占总收入的 46.2%。流域内人口文化素质较低,劳动力接受新技术的能力缓慢,缺乏足够技术骨干(胡淑萍,2008)。

### 1.2.4 怀河流域概况

#### 1. 自然地理条件

怀河流域地处燕山山脉南麓,是华北平原与山区的结合部,属半干旱地区,流域总面积 525km<sup>2</sup>,流域位置见图 1-4。受西伯利亚冷空气和东南暖湿气流交替影响,属大陆性季风气候。年均气温 6~12℃,年降水量 470~850mm。土壤分山地棕壤、褐土、潮土、草甸