

水文过程及其 尺度响应

王鸣远 著

SHUIWEN GUOCHENG JIQI
CHIDU XIANGYING

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水文过程及其 尺度响应

王鸣远 著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



内 容 提 要

本书是作者多年从事水文、水资源科研和教学工作积累的成果。第一篇降水径流过程及其尺度响应（南方篇），针对降水径流过程这个水文学的基本问题，分为降水过程、降水截留过程、坡面产流过程、流域水文过程及其尺度响应等4章，阐述自然界水文要素在不同时间和空间尺度上的演变过程及规律；第二篇蒸发蒸腾过程及其水资源的植被利用（北方篇），在叙述植被蒸腾对地表水资源的利用机理和过程的基础上，针对干旱地区关键地貌区域的水资源合理利用的途径和方式进行分析 and 论证。

本书可供从事水文、水资源、生态和环境保护专业的科技人员以及高等学校和科研院所的研究生参考。

图书在版编目（CIP）数据

水文过程及其尺度响应 / 王鸣远著. — 北京：中国水利水电出版社，2010.8

ISBN 978-7-5084-7837-1

I. ①水… II. ①王… III. ①水文分析：尺度分析—研究 IV. ①P333

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第171913号

书 名	水文过程及其尺度响应
作 者	王鸣远 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	175mm×245mm 16开本 14.25印张 212千字
版 次	2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

水在自然界陆地表面流动，流域首先是一个水文过程单位。但由于很多自然生态现象乃至经济现象均与水循环过程有关，均在流域上发生或实现，流域已不仅仅是一个水文单位，而是一个具有一定结构和功能，相对完整的生态—经济系统。所以，水文过程说到底是一种水文要素相互联系，综合影响陆地、水面环境的生态过程。降水、入渗、径流、蒸发等水文要素的发生和变化过程存在着时空尺度效应，需要研究不同尺度上水文要素过程的特点和规律及其研究方法。降雨径流问题是水文学的基本问题。集水区或流域是水文循环研究的基本单元。流域下垫面空间变异性对于流域水文过程有着十分重要的影响。认识水文要素水动力学及时空过程的不均匀性和变异性是进行水文尺度研究和不同尺度下水文模式研究的基础。随着计算机、地理信息系统、遥感以及全球定位系统等技术的发展，建立地理空间信息和水文过程的联系，对全流域上某个或多个水文过程或状态变量进行时间和空间分布模拟，即分布式流域水文模型的研究与应用也相应地取得了重要的进展。自然界的问题，看似复杂，如果针对研究对象所锁定的研究方向和角度不同，所遵循的数学原理也不同。水文过程及其尺度响应研究的方法是归纳大量实验数据以得出结论，并在实验的基础上简化相应的数学问题并求解，再把这个结果和水文学实验的结论进行比照。显然，水文学研究注重的是用数学来解决科学问题，即主动提出水文过程研究对象中的科学问题，通过问题的解决加深对研究对象的认识，或创造出新的知识。所以，目前流域水文模型的研究和发展方向在理论上要

强化水文过程整体论的指导，在逻辑上实现归纳与演绎推理的相结合，在描述水文现象时实现集总式与分布式的统一，在水文分析方法上实现物理机制认知与应用数学描述的协同。本书的命题为“水文过程及其尺度响应”，主要宗旨是既要关注各个水文要素过程理论的数学部分，又要强调这些水文过程理论的经验部分。

水文过程及其尺度响应的研究不仅可以帮助人们深入地了解自然界水文要素在不同时间和空间尺度上的演变过程和规律，而且为解决水资源的利用问题提供了一个有效的框架和平台。中国的水资源问题，从总体上来讲，主要就是一个开源节流，适当调节区域水资源平衡，防治水污染的问题。对于干旱、半干旱区严重缺水的问题，就是要对现有水资源进行合理管理和利用，本书从提高水分利用效率（WUE）的角度，就提高干旱区降水的植被利用过程和机理进行评述。

综上所述，本书把“水文过程及其尺度响应”问题分为两个部分。第一部分南方篇，针对降雨径流过程这个水文学的基本问题，分为降水过程、降水截留过程、坡面产流过程、流域水文过程及其尺度响应等4章来叙述。第二部分北方篇，在叙述植被蒸腾对地表水资源的利用机理和过程的基础上，针对干旱区关键地貌区域的水资源合理利用的途径和方式进行分析 and 论证。

本书的出版得到了榆林市科技局科技支撑项目“自然生态恢复的水分环境分形规律与节水营林技术”的鼎力支持。

笔者多年从事生态恢复、环境影响评价和水文水资源的科研和教学工作，本书是对流域水文学研究工作成果的总结。由于本人水平有限，书中的缺点和错误在所难免，竭诚欢迎读者批评指正和学术争鸣。

作者

2010年5月18日

目 录

前言

绪论..... 1

第一篇 降水径流过程及其尺度响应 (南方篇)

第 1 章 降水过程及其尺度响应 11

1.1 降水成因 11

1.2 降水的类型及其时空分布特征 12

1.3 实验研究示例：产流降雨特征分析 15

第 2 章 降水截留过程的水文及其尺度响应 36

2.1 降水截留过程研究的对象 36

2.2 降水截留模型 40

2.3 实验研究示例：林分（马尾松）截留效应的研究 44

第 3 章 坡面产流过程及其尺度响应 56

3.1 坡面产流机制 56

3.2 坡面产流模型 59

3.3 实验研究示例：坡地不同土地利用方式的产流、
汇流特征分析 64

第 4 章 流域水文过程及其尺度响应 96

4.1 水文尺度响应及其尺度转换 98

4.2 现行水文模型 102

4.3 水文模拟研究的探索 104

4.4 实验研究示例:实验流域产流、产沙的研究	115
参考文献	138

第二篇 蒸发蒸腾过程及其水资源的植被利用 (北方篇)

第5章 蒸腾测定方法及其植被蒸腾作用的一般规律	143
5.1 蒸发蒸腾过程概述	143
5.2 蒸腾测定方法及其植被蒸腾作用的一般规律	146
5.3 蒸腾作用模型	153
第6章 干旱地区关键地貌类型区土壤水资源利用 (植被利用) 途径	161
6.1 额济纳荒漠绿洲水环境容量与植被利用途径	161
6.2 毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用	169
6.3 沙地灌木林群落土壤水分消耗模型	181
6.4 自然生态恢复的水分环境分形规律与节水营林技术	188
6.5 黄河流域河口镇—龙门区段水资源及其植物利用途径	204
6.6 黄土丘陵沟壑区支毛沟淤地坝坝系规划布设与防洪	214
参考文献	220

绪 论

地球的自然环境是由大气圈、水圈、岩石圈和生物圈所构成,水圈包括地球上所有形式的水,自然界的水从来不是静止的,而是与其他圈之间始终处于相互联系、相互渗透、相互作用之中。在陆地上,人类在长期的兴水利、除水害斗争中积累了丰富的水文知识,然而,水文学初期主要局限于定性的水文地理研究,直到 19 世纪中叶,水文学还只是对一些有关联的水文现象作定性描述。随着近代防洪、航运、灌溉、水电和各种供水需要,水文研究以实用目的为主,并且作为水利技术的一种知识,“工程水文学”应运而生,很快成为水文学的主要内容。从 20 世纪 50 年代起,由于新技术在水文学领域中的应用和水资源管理问题日益突出,水文学的内容和功能也相应得到充实和改进,并且向更专业化领域发展。当代水资源管理问题不仅是河流水文学研究的重点,而且也是生态学研究的一个重要课题。水文过程对生态系统功能的重要影响,表现在水文过程与生态系统植物群落变化相互制约的内在联系。过去,水文学关注最多的是洪水与干旱的成因、工程水文的实际设计应用。随着全球变化,生态环境问题日益突出,由于水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带,关注水与生态问题、关注水文情势与生态环境之间相互作用关系、关注水文循环变化过程与其相关生态环境变化的交叉研究,就产生了生态水文学。生态水文学以生态过程和生态格局的水文学机制为研究核心,以植物与水分关系为基础理论,将尺度问题贯穿于整个研究之中,研究对象涉及森林、湿地、草地、河流湖泊等陆地生态系统的各个子系统,对促进水资源管理和生态环境建设具有重要的作用。

显然,发生在陆地的降水、蒸发、下渗、径流等水文过程与陆地上发

生的所有物理、化学、生物过程以及这些过程与大气过程的相互作用形成复杂的耦合关系,并且在水分循环、流水侵蚀和生物(植被)格局等方面,在不同的空间和时间尺度下具有相应的表现形式和特征(图 0.1)。

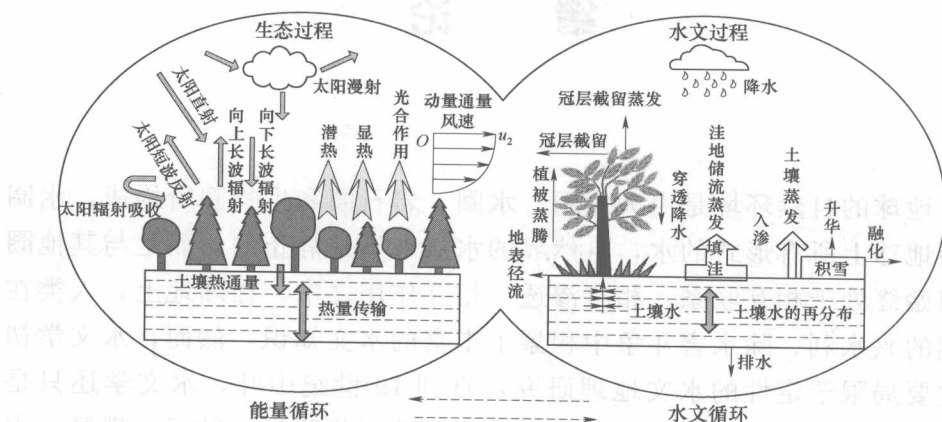


图 0.1 区域/流域水循环和能量循环的相互作用 ($R_n = H + \lambda E + GP = R + E + \Delta S$)

[注: 图中符号的含义, 在能量循环过程中, R_n 、 H 、 λE 和 G 分别为区域/流域平均净辐射量、显热通量、潜热通量和土壤热通量; 在水文循环过程中, P 、 E 、 R 和 ΔS 分别为区域/流域多年平均降水量、蒸发蒸腾量、平均径流量和流域水蓄变量。(摘自 GEF 海河流域水资源与水环境综合管理项目工作简报, 2008 年第 1 期, 水利部、国家环境保护总局 GEF 海河项目办 2008 年 2 月 29 日)]

(1) 水分循环。大尺度水循环研究主要关注大气圈—水圈—生物圈—冰雪圈—岩石圈—社会圈的水循环的综合影响问题; 通过一系列国际研究计划的实施, 如“全球能量与水循环实验”计划 (GEWEX) 等, 研究利用 (大气环流模式) GCMs、遥感技术、世界气象观测网来预测水循环变化; 模拟全球水文循环及其对大气、海洋和陆地的影响; 利用大气与陆地特征的全球观测值确定水循环和能量循环。水文循环大气过程的研究是另一个研究方面, 我国在中国大陆尺度和流域与区域尺度水文循环大气过程研究方面, 做了系统研究 (刘国纬, 1997)。此外, 对区域水分内循环过程的研究也取得重要成果, 揭示出在我国自然条件下, 当地蒸发的水分通过再循环形成的降水约占当地总降水量的 10% 等新事实 (刘国纬等, 1996, 1997)。中尺度水循环研究范围为 200 ~ 2000 km, 主要利用遥感技术研究植被—水的可利用性—蒸散发—气候之间的关系;

研究表明,在 200~2000km 尺度上地表的非均一性,能形成强烈的大气对流。利用大气环流模式研究水循环对下垫面变化的响应,修正大气环流模式,预测区域环境变化、区域开发对水循环的影响。区域尺度上植被叶面的季节性变化对全球尺度的温度和降水(特别是高纬地区)影响很大。高纬地区的温度与赤道的降水存在遥相关。陆地表面参数的变化对亚洲季风的形成、演化和强度有重要影响(薛永康,1999)。小尺度水循环研究范围一般小于 200km,主要研究水、热通量从大气进入不同植物、不同土壤和不同水体后的迁移过程和机理,水文循环界面过程是一个近年研究的前沿和热点。发展从植被的小块到大气环流模式网格单元时空尺度上的土壤—植被—大气系统中能量和水的通用模式(SVAT)。具有代表性的研究成果是农业水循环模拟模型 ACRU (Agricultural Catchments Research Unit; Schulze, R. E. 1995),它是一个多用途的具有物理概念的确定性模型。相关文章有《土壤—植物—大气系统水分运移界面过程研究》(刘昌明等,1997),《土—根界面行为对单根吸水的影响研究》(黄明斌等,1997),《土壤水势—植物叶面水势—蒸腾速率关系研究》(邵明安等,1996)等。水文循环涉及到诸如降水、蒸发、散发、截留、下渗、存蓄和径流等许多复杂的过程。水文循环的时间与空间的变化又直接取决于对这些过程规律的认识。

※※ (2) 流水侵蚀。全球约 90% 的陆地表面受流水侵蚀作用的影响,流水的侵蚀作用十分强大而普遍。大的江河在山区,由于水流急、动能大,它一方面冲刷侵蚀着地表岩石,另一方面可挟带着碎屑摩擦岩石,使岩石遭到破坏,能将高山切割成峡谷。如我国著名的长江三峡、金沙江虎跳峡、黄河三门峡等都是河流的流水长期冲刷切割而成的。沟谷和河流的流水冲刷使得谷底和河床不断加深加宽,坡面上的水流,冲刷着整个坡面,使之趋于破碎。例如我国黄土高原,土层松厚,植被破坏严重,高原面受流水侵蚀作用,形成千沟万壑的地表形态。河流与整个流域时空尺度的关系表现为流域地貌学意义上各种成分的空间配置及其复杂性构成水文学和水力学因子时空分布及其变异性,水流侵蚀的时空变化又直接取决于对这些因子变异性规律(水力学边界条件)的认识。

※ (3) 生物(植被)格局。生物群落多样性与非生物环境的空间异质

性存在着正相关关系,这种关系反映了生命系统与非生命系统之间的依存与耦合关系。实际上,一个区域的生境空间异质性越高,就意味着创造了多样的小生境,允许更多的物种共存。在陆地生态系统中,土壤水分是影响植被结构和组成的最重要的生境资源,尤其是在干旱地区,水分成为关键的生态因子,它实际控制了植被的组成与结构。干旱区植被最显著的特点就是低覆盖度,如果干旱指数系列从 $P/ETP > 1$ (降水量与潜在蒸发量的比值) 降到 $P/ETP < 0.3$, 植被就会从潜在的全面覆盖而演变为破碎的植被冠层到斑块状植被分布状态。在防治土壤水蚀、风蚀的人工植被建设中,由于只考虑植被覆盖度,忽视了斑块格局及其配置方式,出现了干旱、半干旱地区人工植被土壤旱化、稳定性低的问题。这是植被分布格局对水分动态变化(水文过程变化)的响应。另外,不同的植被类型及空间格局对水文过程的影响也不同,具有不同的水文效应。而森林与水之间相互作用关系问题,在保护和恢复各种森林植被、合理利用水资源,充分发挥森林植被的功能等方面是十分重要的议题。

联系到全球变化,联合国调查全球暖化现象的最高科学研究机构——跨政府气候变迁小组(IPCC)在2002年巴黎召开会议后,发表措词强烈的警告:石化燃料造成的污染使地球温度上升,威力更强大的洪水、旱灾与暴风雨在21世纪将接踵而至,极地冰原加速融化,未来1000年整个气候系统将受到严重破坏。与人类发展及生活息息相关的人类健康、陆地与水体生态系统、社会经济系统(包括农业、林业、渔业及水资源)等均对气候变化异常敏感。社会的不同领域将面临不同的影响而需做出不同的适应对策。在这里有必要明确气候变化的概念,它是指气候平均状态统计学意义上的巨大改变或持续较长一段时间的(典型的为10年或更长)气候变动。气候变化的原因可能是自然的内部进程或外部强迫,或者对大气组成和土地利用的持续性的人为改变。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)第一款将“气候变化”定义为“经过相当一段时间的观察,在自然气候变化之外由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变”。UNFCCC因此将因人类活动而改变大气组成的“气候变化”与归因于自然原因的“气候变率”区

分开来。对气候系统响应温室气体和气溶胶的排放或浓度构想以及辐射强度情景等的气候预计，往往基于气候模式的模拟。气候预计与气候预测不同，气候预计主要根据一些设想和关注的问题，例如未来可能的或不可能实现的社会经济和技术发展状况，应用排放浓度/辐射强迫情景对气候进行的预计，具有很大的不确定性。而气候预测或气候预报是对未来（如季节、年际或长时间尺度）气候的实际演变过程进行最接近的描述或估测的一种手段。气溶胶粒子能够从两方面影响天气和气候。一方面可以将太阳光反射到太空中，从而冷却大气，并会使大气的能见度变坏；另一方面却能通过微粒散射、漫射和吸收一部分太阳辐射，减少地面长波辐射的外逸，使大气升温。有研究表明气溶胶对全球变暖的“冷却效应”很微弱。基于不同气候敏感度及不同温室气体排放情景，气候模型运算结果表明，到 21 世纪末，全球近地表平均气温将增加 $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ ，海平面上升 $15\sim 95\text{cm}$ 。在区域的尺度上，这种预测的可靠性还不高，变化的幅度还具有不确定性。然而，一些潜在的严峻变化已经得到确认，这些变化包括异常高温、低温、冰雪灾害、洪水及干旱的发生。

“经济不能持续成长势将威胁和平与繁荣，但如果经济成长是以全球气候受害为代价，和平与繁荣也同样会受到威胁。”气候变化将导致全球水文循环的加剧并对区域水资源产生影响，在中国具体表现在以下 3 个方面。

(1) 水多。洪水安全问题，气温增高，大气保持水汽的能力加强，遇到冷空气就容易产生强降雨，一些局地性的暴雨有可能增多加强。无论南方和北方，气候变化使洪水发生的概率增大。还有全球变暖导致海平面上升，将使得沿海地区的防洪形势进一步严峻。

(2) 水少。供水安全就是有没有足够的水给人们用。过去的 30 年来，由于人类活动和气候变化的共同影响，我国北方的河流径流量大大减少，城市缺水日趋严重。海河流域降水减少 10% 左右，径流量减少 40%~60%。黄河上中游无论降水增减多少，气温升高将导致陆面蒸发量加大，威胁植被和农作物安全。西北季节性积雪将趋于减少，冰川将继续后退萎缩。西北干旱化的趋势继续，则多数内陆湖泊明显收缩，有

的则趋于干缩。南方地区的季节性干旱加剧等。

(3) 水环境恶化。气温升高之后,对水体生物的生活环境会产生影响,水体生物的分布会发生变化;水体容易产生蓝藻、富营养化等问题,再加上降雨减少,径流减少,对水的稀释能力变小,自净能力减弱,水脏、水浑、水生态退化等水问题。

综上所述,我国水资源可持续利用中严重存在的洪涝干旱灾害、水资源不足和水环境恶化三大问题,一方面与我国经济快速发展的外部压力密切相关,另一方面与气候的变异与变化密切相关。

气候变化可以改变全球或者区域水文循环的现状,国外一些研究认为,即使没有人类干预,地球气候也不稳定,可能在短期突然发生冷暖变动振荡,从而引起水资源在时空上的重新分配,并对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响。从现代水资源的概念出发,水资源是指与人类生存和发展以及生态环境保护密切相关的、可以利用的,又可以再生(能得到恢复更新)的天然淡水,其补给来源为大气降水,其真正的消耗为蒸腾蒸发(即ET)。“水资源是可以再生的天然淡水”,是维持陆地生态环境的基本要素,是人类生存与发展不可代替的自然资源。问题是水循环及水资源有什么地区、区域特征规律?人类活动对水循环及水资源有哪些主要影响?如何量化人类活动对水循环及水资源的变化和影响?因此,积极开展水文过程及其尺度响应的科学基础研究,对于阐明土地利用/覆被变化与水循环、碳循环的关系,对于厘清从“点”到“面”的水循环机理、水文循环与生态系统的相互作用、地表水与地下水交换的相互作用,“大气—土壤—植被”界面过程中的水分转化规律具有十分重要的意义。中国的实际情况是人类活动对水文过程的影响是巨大的和惊人的。在中国南方流域,最突出的是湖泊围垦(湖区开发、三峡工程)、森林过度砍伐等对降雨径流过程关系影响的水科学基础问题;在中国北方和西北干旱、半干旱地区,干旱问题应联系陆地水文过程研究的成果,研究植被蒸散、土壤水分传输、径流和下渗等过程,以探求干旱发生的内在机制。“水资源的真正消耗是蒸发蒸腾”,在水资源越来越紧缺的今天,必须从基本原理开始研究如何节约水资源。自然界中许多蒸发蒸腾是不可以控制的,在干旱地区以及干旱与半干旱

地区，如何确保植物生长所需的蒸腾水量，减少无效蒸发，是提高有效水分生产率，体现现代水资源真实节水的核心。

因此，本书分两个方面内容阐述水文过程及其尺度响应的机理。在南方地区，选择实验流域研究降水径流过程及其尺度响应；在北方干旱、半干旱地区，研究蒸发蒸腾过程及其水资源的植被利用。

第一篇

降水径流过程及其 尺度响应 (南方篇)

