

# 现代 水 文 学

左其亭 王中根 著

黄河水利出版社

# 现代水文学

左其亭 王中根 著

黄河水利出版社

## 内容提要

本书试图在总结过去研究工作的基础上,阐述现代水文学的理论、方法及应用,为水问题(水文、水资源与可持续发展)研究提供现代水文学的研究基础。本书共分四大部分九章。第一部分是现代水文学研究及其问题的综述;第二部分介绍了水文系统识别理论方法及“3S”技术在水文学中的应用;第三部分对分布式水文模型、水文-生态耦合系统模型进行研究;第四部分是对目前十分关注的水资源可再生性和可持续水资源管理问题进行研究。本书可供水利、水文、水资源、环境及有关专业的教师、本科生、研究生以及科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代水文学/左其享,王中根著. —郑州:黄河水利出版社, 2002. 1

ISBN 7-80621-531-X

I. 现... II. ①左... ②王... III. 水文学  
IV.P33

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第088919号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371 6022620

E-mail:yrcp@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄委会设计院印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:11.625

字数:270千字

印数:1-1000

版次:2002年1月第1版

印次:2002年1月第1次印刷

---

书号:ISBN 7-80621-531-X/P·22

定价:26.00元

# 前 言

水文学是地球科学的一个重要分支。它是一门研究地球上水的起源、存在、分布、循环和运动等变化规律，并运用这些规律为人类服务的知识体系。水文学同其它学科一样，在人类长期实践过程中，经历起源、不断发展、再到成熟等阶段。可以说，水文学是人类长期与水作斗争，不断地观测、研究水文现象及其规律性而逐步形成的一门科学。

由于客观世界的复杂性、广泛存在的不确定性以及人类认识上的局限性，水文学上仍有许多难点问题（如不确定性问题、非线性问题、水文尺度问题等）在理论上和实际应用上未能很好解决。实际上，人类发现问题、认识问题再到解决问题，是一个变化发展的过程。人们常说的“水文学已经发展到了成熟阶段”并非意味着“水文学十分完备、不需再发展”，实际上，它像其它发展中的学科一样，一直处在不断发展之中。特别是，随着现代科学技术的发展，以前没有发现的问题，现在发现了，以前没有解决的问题，现在在逐步解决，使得水文学不断发展、不断壮大。

近几十年来，尽管水文学在理论及应用上都有很大的发展，也增添了许多新的内容。然而，缺乏一本及时反映现代水文学发展的专著。也就是在这种形势下，本书应运而生。

传统的水文学只侧重研究自然界水文循环的水量方面，多采用水文现象观测、实验等手段，运用传统的数学、物理方法来研究，其应用多限于洪水预报、水文水利计算等工程技术问题。随着社会经济的发展，人类对水的需求不断增大，对生活的环境质量要求也愈来愈高。自然界发生的洪水和干旱等灾害以及人类经济活动造成的水污染和生态系统破坏，对社会经济发展和人类生命财产造成的损失与付出的代价也愈来愈大。如何解决实际问题中出现的与水有关的各种矛盾？如何实现社会经济的可持续发展？这对传统水文学的发展提出了挑战。它表现在：人的认识和理论研究方面，以及解决实际问题的应用方面。

现代水文学有别于传统水文学，主要表现在“现代”（Modern）二字上。它应该是水文学上全新的概念、思路和方法的总结。具体地说，是以现代新技术（如计算机技术、“3S”技术等）应用为支撑，在宏观和微观两个相对方向上进行深入研究。在宏观上，现代水文学研究全球气候变化、人类活动影响和自然环境变化下的水文循环。在微观上，现代水文学研究SVAT（土壤-植被-大气系统）中水分与热量的交换，探讨“三水”、“四水”及“五水”（大气水、地表水、土壤水、地下水及植被水）的转化规律。现代水文学还十分注重水文尺度问题研究、水文非线性系统研究、不确定性研究、水文模型研究和水资源可持续利用水文学基础问题的研究等等。

针对以上问题，作者在最近的数年中，特别是在读博士（或博士后）期间，得益于国

际著名水文学家、国际水文科学协会水资源委员会副主席夏军教授的指导，并参与国家重点基础研究发展规划项目、国家自然科学基金资助项目以及其它横向研究项目，在水文学基础研究、“3S”技术在水文学中应用研究、分布式水文模型及水文-生态耦合系统模型研究、水资源可再生性研究、可持续水资源管理理论及应用研究等方面，做过一些系统研究工作。

本书试图在总结过去研究工作的基础上阐述现代水文学的理论、方法及应用，为水问题（水文、水资源与可持续发展）研究，提供现代水文学研究基础。

全书共分九章。第一、三、四、七、九章由左其亭撰写，第二、五、六、八章由王中根撰写，全书最后由左其亭统稿。

第一章介绍了水文学的概念及发展过程，并在此基础上提出现代水文学的研究体系及内容。

第二章介绍了水文学的基础内容——水循环的概念、原理及研究进展。以此内容为突破口，将在后面章节中详细介绍有关水循环的研究成果，包括分布式水文模型、水文-生态耦合系统模型以及水资源可再生性理论研究等。

第三章阐述了当前水文学的几个主要科学问题，即水文不确定性问题、非线性问题、尺度问题。初步介绍这些科学问题的概念、研究意义与基本方法，为进一步研究奠定基础。

第四章介绍了水文系统识别的一些基本知识，包括水文系统识别的概念、原理、方法。水文系统识别，是近几十年来随着系统理论在水文学领域的运用而发展起来的一门新兴分支学科。它的特色在于运用系统分析的原理和方法建立可以定量描述水文过程的数学模型。在水文过程模拟，水文分析与计算、洪水和枯水预报，以及水资源与水环境系统规划、管理、决策控制等方面，有着广阔的应用前景。在本章最后，介绍了人工神经网络（ANN）非线性系统理论方法，以及水文系统识别方法在灌溉蒸发量计算中的应用。

第五章在介绍“3S”技术（即遥感（RS）、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS））的基础上，阐述了水文遥感的内容及其应用。本章主要是介绍数字高程模型（DEM）的基本知识以及在水文模拟中的应用，它是随着“3S”技术的发展而发展起来的一种新的研究方法和手段，是研究分布式水文模型的基础。

第六章论述了代表水文模型发展方向的分布式水文模型。首先，介绍了分布式水文模型的概念，以及分布式水文模型的发展过程。在此基础上，详细介绍了基于DEM的流域分布式水文模型的研制及应用。

第七章论述了水文-生态耦合系统模型。为了定量表达水文系统与生态系统之间的联系，本章介绍了水文系统与生态系统相耦合的系统模型。它是研究可持续水资源管理的水文学、生态学基础模型，在可持续水资源管理量化研究中占重要地位。

第八章论述了水资源可再生性研究的理论方法。本章介绍新近提出的水资源可再生性的概念、表示方法以及研究理论等内容。这是在分析水循环机理的基础上,提出描述单元和流域水文循环特征参数,提出度量可再生性的指数。为研究水资源可持续利用和可再生性维持机理奠定基础。

第九章论述了可持续水资源管理量化研究的理论方法。可持续水资源管理是当今水问题研究的热点之一。目前,国际上对可持续水资源管理的研究大都停留在概念的提法和定性的分析上,缺乏量化方法和成功应用实例的研究。本章主要探讨可持续水资源管理量化研究方法,并简单介绍在新疆博斯腾湖流域成功应用实例。内容主要包括:可持续水资源管理的量化准则、量化指标;量化研究方法以及可持续水资源管理优化模型等。

《现代水文学》是一部系统介绍现今水文学研究进展的专著。但是,又必须指出,本书并不能包罗现代水文学上的全部内容,也不是这些内容的无关罗列。而是主要抓住现代水文学的重点内容和作者认为比较成熟的内容以及作者的主要研究成果。同时,也必须指出,现代水文学是不断发展的,可能现在是新的内容,再过若干年,又被更新的内容所代替。因此,本书的内容应在今后研究的基础上不断更新。从这个意义上讲,本书起到“抛砖引玉”的作用。希望通过本书的“抛砖引玉”,能有助于水文学理论与应用研究的发展。

作者十分感谢恩师夏军教授的鼓励与教诲!在作者的研究工作中,得益于导师夏军教授的启发、指导和帮助!作者还要感谢教育作者多年的师长潘元伯教授、王清印教授、刘开弟教授、郝旭副教授;感谢作者的学长和同仁陈嘻研究员、张翔博士后、穆宏强博士、史晓新博士、吴泽宁教授、贺北方教授、马细霞副教授等的帮助和支持;感谢出版社同仁为本书出版付出的辛勤劳动。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均已在参考文献中列出。在此一并致谢。

本书的研究工作得到了国家重点基础研究发展规划项目(G19990436和G19990435)、国家自然科学基金、河南省自然科学基金、河南省杰出青年基金项目、河南省科技攻关项目的资助以及其它横向研究课题的支撑,特此向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。

由于《现代水文学》追求的目标是介绍现代较新的理论与方法,这给编撰本书增加了难度。再加上作者时间仓促,特别是水平所限,虽几经改稿,书中错误和缺点在所难免,欢迎广大读者不吝赐教。

作者

2002年元旦

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 水文学的发展</b> .....	(1)
§ 1.1 水文学的概念 .....	(1)
§ 1.2 水文学的发展 .....	(2)
§ 1.3 现代水文学的特点及体系 .....	(3)
<b>第二章 水循环理论与进展</b> .....	(5)
§ 2.1 水循环与水量平衡 .....	(5)
§ 2.2 产汇流原理 .....	(8)
§ 2.3 水循环研究进展 .....	(12)
<b>第三章 水文学前沿科学问题</b> .....	(17)
§ 3.1 水文不确定性问题 .....	(17)
§ 3.2 水文非线性问题 .....	(20)
§ 3.3 水文尺度问题 .....	(23)
<b>第四章 水文系统识别理论及应用</b> .....	(29)
§ 4.1 水文系统识别的概念 .....	(29)
§ 4.2 水文系统识别的原理与方法 .....	(32)
§ 4.3 人工神经网络(ANN)水文非线性模型及应用 .....	(35)
§ 4.4 水文系统识别应用——干旱区灌溉蒸发量计算 .....	(42)
<b>第五章 “3S”技术在水文中的应用</b> .....	(47)
§ 5.1 “3S”技术概论 .....	(47)
§ 5.2 水文遥感及其应用 .....	(50)
§ 5.3 DEM 在水文模拟中的应用 .....	(53)
<b>第六章 分布式水文模型</b> .....	(61)

§ 6.1 水文模型的发展 .....	(61)
§ 6.2 分布式水文模型研究概况 .....	(63)
§ 6.3 基于 DEM 的流域分布式水文模型的研制 .....	(64)
<b>第七章 水文-生态耦合系统模型 .....</b>	<b>(83)</b>
§ 7.1 研究意义 .....	(83)
§ 7.2 MBM 建模原理与思路 .....	(85)
§ 7.3 MBM 建模步骤 .....	(86)
§ 7.4 应用举例 .....	(94)
<b>第八章 水资源可再生性理论与评价 .....</b>	<b>(99)</b>
§ 8.1 水资源可再生性概念 .....	(99)
§ 8.2 水资源可再生性描述方法 .....	(101)
§ 8.3 水资源可再生性评价理论与方法 .....	(115)
<b>第九章 可持续水资源管理理论与方法 .....</b>	<b>(130)</b>
§ 9.1 现代水文水资源问题 .....	(130)
§ 9.2 可持续水资源管理的提出 .....	(132)
§ 9.3 可持续水资源管理量化研究的基础 .....	(135)
§ 9.4 可持续水资源管理量化准则及量化指标体系 .....	(138)
§ 9.5 可持续水资源管理的量化方法 .....	(147)
§ 9.6 可持续水资源管理优化模型及其求解方法 .....	(160)
§ 9.7 应用实例——博斯腾湖流域可持续水资源管理研究 .....	(164)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(174)</b>



## 第一章 水文学的发展

水文学是人类长期与水作斗争,不断观测、研究水文现象及其规律性而逐步形成的一门科学。经历了一个由萌芽到成熟、由定性到定量、由经验到理论的发展过程。如今的水文学已是分支众多、应用广泛、理论成熟、学科前沿不断扩大、新分支学科不断兴起,表现十分活跃的研究领域,及时把现今水文学的研究进展整理成一套理论体系就成为现代水文学的重任。

本章在介绍水文学研究发展的基础上,重点介绍现代水文学的特点与体系。

### § 1.1 水文学的概念

水文学是地球科学的一个重要分支。1962年美国联邦政府科技委员会把“水文学”定义为“一门关于地球上水的存在、循环、分布,水的物理、化学性质以及环境(包括与生活有关事物)反应的学科”。1987年《中国大百科全书》提出水文科学是“关于地球上水的起源、存在、分布、循环运动等变化规律和运用这些规律为人类服务的知识体系”。

不管如何定义,基本上是把水文学总结成“是一门研究地球上各种水体的形成、运动规律以及相关问题的学科体系”。毫无疑问,它研究的主要对象是自然界客观存在且人类赖以生存的“水”,水永远是影响人类社会发展的的重要因素。因此,水文学在认识自然、改造世界的斗争中,有着重要的意义和广阔的前景。

水文学涉及的内容十分广泛,包括许多基础科学问题,具有自然属性,是地球科学的组成部分。因为水循环使水圈、大气圈和岩石圈紧密联系起来,故水文学与地球科学中的其它学科如气象学、地质学、自然地理学等密切相连。

另一方面,由于水文学在形成与发展过程中,直接为人类服务,并受人类活动的影响,具有社会属性,又属于应用科学的范畴。由于人类对水循环的影响作用越来越大,在这种情况下,急需研究人类活动影响下的水文效应与水文现象,站在变化的自然和变化的社会中,来研究水文问题。这种趋势在现代水文学上表现日益突出。

水文学开始主要研究陆地表面的河流、湖泊、沼泽、冰川等,以后逐渐扩展到地下水、土壤水、大气水和海洋水。传统的水文学是按照研究的水体来进行划分的,主要有:河流水文学、湖泊水文学、沼泽水文学、冰川水文学、海洋水文学、地下水文学、土壤水文学、大气水文学等。

根据水文学上主要采用的实验研究方法,水文学又派生出三个分支学科:水文测验学、水文调查、水文实验。

根据水文学研究内容的不同,水文学又可划分为:水文学原理、水文预报、水文分析与计算、水文地理学、河流动力学等分支学科。

作为应用科学,水文学又分为:工程水文学(包括水文计算、水文预报等)、农业水文学、土壤水文学、森林水文学、城市水文学等。

另外,随着新科学新技术的引进,水文学又出现一些新的分支,如随机水文学、模糊水文学、灰色系统水文学、遥感水文学、同位素水文学等。

总之,水文学是一个十分活跃的舞台。随着学科的相互渗透、相互交叉以及新科学新技术的发展和引进,水文学中新分支学科不断兴起,有些学科虽然尚欠成熟,但表现出水文学发展的日新月异和巨大活力。

## § 1.2 水文学的发展

人类在争取生存和改善生活的生产实践中,特别是在与水灾、旱灾作斗争的过程中,对经常出现的水文现象进行探索,在不断认识和积累经验的基础上,并吸取其它基础科学的新思想、新理论、新方法,才逐步形成水文学。可以说,水文学的发展经历了由萌芽到成熟、由定性到定量、由经验到理论的过程。我们可以把它大致分为四个阶段。

### 1. 萌芽阶段(公元16世纪末以前)

该时期为了生活和生产的需要,开始了原始的水位、雨量观测,对水流特性进行观察,并对水文现象进行定性描述、经验积累、推理解释。世界上最早的水文观测出现在中国和埃及,比如,在《吕氏春秋》、《水经注》等古代著作中,系统记载了我国各大河流的源流、水情,并记载了水文循环的初步概念及其它水文知识。

当然,该时期,由于人们的认识能力有限,对自然界水文现象了解不够,也不可能上升到水文学理论高度上,因此这一漫长的发展阶段仅仅称得上是水文学的发展起源或萌芽阶段。

### 2. 形成阶段(公元17世纪初~19世纪末)

该时期随着自然科学技术的迅速发展,水文观测实验仪器不断被发明和使用,特别是在19世纪以来,各国普遍建立水文站网和制定统一的观测规范,使实测的水文数据成为科学分析的依据,是实验水文学兴起阶段。并在此基础上,发现了一些水文学的基本原理,从而奠定了水文学的基础,逐步形成了水文学体系。

该阶段的特点是,水文现象由定性描述到定量表达,水文学基本理论初步形成。

### 3. 兴起阶段(公元20世纪初~20世纪60年代)

该时期,由于社会经济迅速发展,水利、交通、动力等急需大量开发,迫切需要解决工程建设中的许多水文问题;又由于实测水文资料的增长,水文站网的扩展,促进了水文预报和计算工作的发展。从而使应用水文学得到广泛的发展。在该时期,除了出现许多经验公式和预报方法外,还出现了许多结合成因分析的推理公式、合理化公式以及相关因素预报方法等。

该阶段的特点是,水文观测理论体系进一步成熟,应用水文学进一步发展,水文学理论体系逐步完善。

#### 4. 现代阶段（公元 20 世纪 60 年代以后）

20 世纪 60 年代以来，一方面，随着计算机技术的发展和遥感遥测技术的引用，一些新理论和边缘学科的不断渗透，使得水文学发展增添许多新的技术手段、理论与方法，由此也派生出许多新的学科分支，当然也使水文学理论更加丰富；另一方面，由于人类改造世界的能力不断增强，活动范围不断扩大，再加上人口膨胀，出现了水资源短缺、环境污染、气候变化等一系列问题，使水文学面临着机遇与挑战，特别是需要开展水资源及人类活动水文效应的研究。这也促进水文学进入了现代水文学的新阶段。

本阶段的特点是，引进计算机技术和遥感遥测技术，一些新理论、新方法和边缘学科不断渗透，分支学科不断派生，研究方法趋于综合，重点开展水资源及人类活动水文效应的研究。

### § 1.3 现代水文学的特点及体系

从上述水文学发展历程可以看出，现代水文学是在近几十年中由于先进科学技术和理论方法的引入以及社会经济各项人类活动的深入，不断丰富水文学而形成的。与传统水文学相比，具有以下特点。

(1) 现代水文学以新技术（计算机技术、“3S”技术等）应用为支撑，在宏观和微观方向上得到了深入发展。在宏观上，现代水文学研究全球气候变化、人类活动影响和自然环境下的水文循环。在微观上，现代水文学研究 SVAT（土壤-植被-大气系统）中水分与热量的交换，探讨“三水”、“四水”及“五水”（大气水、地表水、土壤水、地下水及植被水）的转化规律。现代水文学还十分注重水文尺度问题和水资源可持续利用水文学基础问题的研究。

(2) 更加注重水文学上水文信息的挖掘。由于先进技术的引用，使复杂、困难的水文信息获取成为现实，原来不能得到或需要很大代价才能得到的水文信息，现在成为可能或容易。这为深入研究水文学提供了支持。

(3) 更加深入开展深层次的水文科学基础研究。包括：水文极值（洪水和干旱）问题的认识、预测与减灾，全球冰圈、气候和温室效应的相互作用，冰盖河流水文学，水文与大气交换作用，陆面模型参数区域化。

(4) 更加注重人类活动对水文循环影响的研究。包括：土地利用变化对水质的影响，地表水和地下水、水量水质相互作用问题，城市化对地表和地下水质的影响，水文学生态学研究。

(5) 对水文学上众多难点问题（如不确定性问题、非线性问题、水文尺度问题等）开展力所能及的研究。

(6) 传统的水文学多侧重研究自然界水文循环的水量方面，多采用水文现象观测、实验等手段，运用传统的数学、物理方法来研究，其应用多限于洪水预报、水文水利计算等工程技术问题。但是，随着社会经济的发展，人类对水的需求不断增大，对生活的环境质量要求也愈来愈高。自然界发生的洪水和干旱等灾害以及人类经济活动造成的水污染和生态系统破坏，对社会经济发展和人类生命财产造成的损失与付出的代价也愈来愈大。如何解决实际问题中出现的

与水有关的各种矛盾？如何实现社会经济的可持续发展？这对传统水文学的发展提出了挑战。现代水文学就要针对这些实际问题，重点开展水资源及人类活动水文效应的研究。

现代水文学有别于传统水文学，主要表现在“现代”（Modren）二字上。它应该是水文学上全新的概念、思路和方法的总结。具体地说，是以现代新技术（如计算机技术、“3S”技术等）应用为支撑，以现代新理论新方法（如灰色系统理论、人工神经网络、分形几何等）为基础，以现代出现的新问题新要求（如水环境、人类活动影响、水资源短缺、水资源可持续利用等）为研究动力，对水文学基础理论及应用进行深入研究。

针对以上问题，作者在最近的数年中，特别是在读博士上（或博士后）期间，得益于国际著名水文学家、国际水文科学协会水资源委员会副主席夏军教授的指导，并参与多项研究工作，在水文学基础研究、“3S”技术在水文学中应用研究、分布式水文模型及水文-生态耦合系统模型研究、水资源可再生性研究、可持续水资源管理理论及应用研究等方面，做过一些系统研究工作。本书试图在总结过去研究工作的基础上阐述现代水文学的理论、方法及应用，为水问题（水文、水资源与可持续发展）研究，提供现代水文学研究基础。当然，本书不可能包括现代水文学研究的所有内容，也不是这些内容的无关罗列。而是主要抓住现代水文学的重点内容和作者认为比较成熟的内容以及作者的主要研究成果。

全书体系包括四大部分：

第一部分，绪论。是对现代水文学研究及其问题的综述。内容包括第一、二、三章。

第二部分，新技术新理论及其应用。分别介绍了一种新理论和一种新技术。内容包括第四、五章。

第三部分，模型研究。是对代表水文模型发展方向的两种模型（即分布式水文模型、水文-生态耦合系统模型）进行研究。内容包括第六、七章。

第四部分，应用基础研究。是对目前十分关注的水资源可再生性和可持续水资源管理问题进行研究。内容包括第八、九章。

同时，也必须指出，现代水文学是不断发展的，可能现在是新的内容，再过若干年，又被更新的内容所代替。因此，本书的内容应在今后研究的基础上不断更新。

## 第二章 水循环理论与进展

水循环理论是水文学的重要基础内容之一。水循环是联系大气圈和生物圈相互作用的纽带,是水资源可持续利用的物理基础。在水循环的一系列过程中,通过大气降水、植被截留、地表径流、入渗、地下径流、蒸发和植物蒸腾等各个环节,使大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互联系起来,并在它们之间进行水量和能量交换。由于水循环运动,使大气降水、地表水、土壤水、地下水之间相互转化,使水资源形成不断更新的统一系统。也正是由于水循环作用,使水资源成为可再生资源,才能谈论水资源的可持续利用问题。

本章将介绍水循环的概念、原理及研究进展。这是本书后面章节研究分布式水文模型、水文-生态耦合系统模型以及水资源可再生性理论、可持续水资源管理等内容的基础。

### § 2.1 水循环与水量平衡

#### 2.1.1 自然界的水循环

水循环是指地球上的水在太阳辐射和重力的作用下,以蒸发、降水和径流等方式进行周而复始的运动过程。自然界的水循环是连接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽带,是自然环境中发展演变最活跃的因素,并使地球获得淡水资源。全球水循环时刻都在进行着,它发生的领域有:海洋与陆地之间,陆地与陆地上空之间,海洋与海洋上空之间。水循环示意如图 2.1.1。

##### 2.1.1.1 海陆间水循环

海陆间水循环,是指海洋水与陆地水之间通过一系列的过程所进行的相互转化。具体过程是:广阔海洋表面的水经过蒸发变成水汽,水汽上升到空中随着气流运动,被输送到大陆上空,其中一部分水汽在适当的条件下凝结,形成降水。降落到地面的水,一部分沿地面流动形成地表径流;一部分渗入地下,形成地下径流。二者经过江河汇集,最后又回到海洋。这种海陆间的水循环又称大循环。通过这种循环运动,陆地上的水就不断地得到补充,水资源得以再生。

##### 2.1.1.2 内陆水循环

降落到大陆上的水,其中一部分或全部(指内流区域)通过陆面、水面蒸发和植物蒸腾形成水汽,被气流带到上空,冷却凝结形成降水,仍降落到大陆上,这就是内陆水循环。由内陆水循环运动而补给陆面上水体的水量为数很少。

##### 2.1.1.3 海上内循环

海上内循环,就是海洋面上的水蒸发成水汽,进入大气后在海洋上空凝结,形成降水,又降到海面。



图 2.1.1 水循环示意图

#### 2.1.1.4 水循环周期

据计算, 大气中总含水量约  $1.29 \times 10^6$  亿  $m^3$ , 而全球年降水总量约  $5.77 \times 10^6$  亿  $m^3$ , 大气中的水汽平均每年转化成降水 44 次 ( $5.77 \times 10^6 / 1.29 \times 10^6$ ), 也就是大气中的水汽, 平均每 8 天多循环更新一次 ( $365/44$ )。全球河流总储水量约  $2.12 \times 10^6$  亿  $m^3$ , 而河流年径流量为  $4.7 \times 10^5$  亿  $m^3$ , 全球的河水每年转化为径流 22 次 ( $4.7 \times 10^5 / 2.12 \times 10^6$ ), 亦即河水平均每 16 天多更新一次 ( $365/22$ )。水是一种世界性的不断更新的资源, 具有取之不尽的特点。但是在一定的空间和时间范围内, 水资源又是有限的。如果人类取用水量超过更新的数量, 就要造成水资源的枯竭。

#### 2.1.2 全球的水量平衡

##### 2.1.2.1 全球储水量

地球的总储水量约  $1.38 \times 10^{16}$  亿  $m^3$ , 其中海水约  $1.34 \times 10^{16}$  亿  $m^3$ , 占全球总水量的 96.5%。余下的水量中地表水占 1.78%, 地下水占 1.69%。

人类利用的淡水约  $3.5 \times 10^8$  亿  $m^3$ , 主要通过海洋蒸发和水循环而产生, 在全球总储水量中只占 2.53%。淡水中只有少部分分布在湖泊、河流、土壤和浅层地下水中, 大部分则以冰川、永久积雪和多年冻土的形式存储。其中冰川储水量约  $2.4 \times 10^8$  亿  $m^3$ , 约占世界淡水总量的 69%, 大部分都存储在南极和格陵兰地区。

## 2.1.2.2 水量变化规律

地球上的水时时刻刻都在循环运动，在相当长的水循环中，地球表面的蒸发量同返回地球表面的降水量相等，处于相对平衡状态，总水量没有什么变化。但是，对某地区来说，水量的年际变化往往很明显，河川的丰水年、枯水年常常交替出现。降水量的时空差异性导致了区域水量分布极其不均。

在水循环和水资源演变中，水量平衡是一个至关重要的基本规律。根据水平衡原理，某个地区在某一段时期内，水量收入和支出差额，等于该地区的储水变化量。一般的流域水平衡方程式可表达为

$$P - E - R = \Delta S \quad (2.1.1)$$

式中， $P$ 为流域降水量； $E$ 为流域蒸发量； $R$ 为流域径流量； $\Delta S$ 为流域储水变量。从多年平均来说，流域储水变量 $\Delta S$ 的值趋于零。

流域多年水平衡方程式为

$$P_0 = E_0 + R_0 \quad (2.1.2)$$

式中， $P_0$ 、 $E_0$ 、 $R_0$ 分别代表多年的平均降水量、蒸发量、径流量。

海洋的蒸发量大于降水量，多年平均降水量平衡方程式可写为：

$$P_0 = E_0 - R_0 \quad (2.1.3)$$

全球多年平均水平衡公式为

$$R_0 = E_0$$

据估算，全球平均每年海洋上约有 5 050 000 亿  $m^3$  的水蒸发到空中，而总降水量约为 4 580 000 亿  $m^3$ ，总降水量比总蒸发量少 470 000 亿  $m^3$ ，这同陆地注入海洋的总径流量相等。如表 2.1.1。

表 2.1.1 全球水平衡表 (单位: 亿  $m^3$ )

区 域	多年平均蒸发量	多年平均降水量	多年平均径流量
海 洋	5 050 000	4 580 000	-470 000
陆地外流区域	630 000	1 100 000	470 000
陆地内流区域	90 000	90 000	
全 球	5 770 000	570 000	

掌握水循环和水平衡的规律，便可以改变水的时间和空间分布，化“水害”为“水利”。目前，人类活动对水循环的影响主要表现在调节径流和增加降水等方面上。通过修建水库等拦蓄洪水，可以增加枯水径流。通过跨流域调水等可以平衡地区水量的分布。通过植树造林等能增加入渗，调节径流，加大蒸发，在一定程度上可调节气候，增加降水。而人工降雨、人工消雹

和人工消雾等活动则直接影响水汽的运移途径和降水过程，通过改变局部水循环来达到防灾抗灾的目的。当然，如果忽视了水循环规律，不恰当地改变水的时间和空间分布，如大面积地排干湖泊、过度引用河水和抽取地下水等，就会造成湖泊干枯、河道断流、地下水位下降等，导致水资源枯竭，给生产和生活带来不利的后果。因此，了解水循环的基本规律，对合理利用自然界的水资源，是十分重要的。

## § 2.2 产汇流原理

径流过程是水循环中最关键和最复杂的物理过程。我们知道，降落到陆地上的水，一部分蒸发，返回大气；一部分经植物截留、下渗、填洼及地面滞留后，通过不同途径形成地面径流、壤中流和地下径流，汇入江河，流入湖海。产汇流理论便是揭示径流形成和演变的机制与原理，为水循环过程的模拟与研究提供重要的理论依据。

### 2.2.1 产流理论

#### 2.2.1.1 产流机制

产流机制是指降雨产生径流的基本物理条件，它取决于下垫面结构及降雨特性。目前研究表明，“超渗”产流和“蓄满”产流是自然界中基本的两种产流模式，它们是现行流域产流量计算方法的基础。

##### 1. 超渗产流

早在 1935 年 Horton 在《地表径流现象》论文中明确指出，降雨强度 ( $i$ ) 超过地面下渗能力 ( $f_p$ ) 和包气带缺水水量 ( $D$ ) 得到满足，即下渗到包气带中的水量 ( $D$ ) 与其蒸发量 ( $E$ ) 之差超过其缺水水量 ( $D$ )，是产流的基本物理条件。Horton 断言：

当  $i \leq f_p$ ,  $I-E \leq D$  时，无径流产生，河流处于原先的退水状态；

当  $i > f_p$ ,  $I-E \leq D$  时，河流中将出现尖瘦且涨落洪段大致对称的洪水过程线，它是由单一地面径流所形成；

当  $i \leq f_p$ ,  $I-E > D$  时，河流中将出现矮胖且涨落洪段大致对称的洪水过程线，它是由单一地下水径流所形成；

当  $i > f_p$ ,  $I-E > D$  时，河流中将出现涨洪快速、落洪缓慢、具有明显不对称的洪水过程线，它显然由地面和地下两种径流成分混合所形成。

Horton 产流理论正确地阐明了均质包气带情况下超渗地面径流和地下水径流产生的物理条件。在某种程度上讲，他指出了径流产生的最基本规律。

##### 2. 蓄满产流

在自然界中，许多情况下包气带的岩土结构并非均质，而是具有一定的层次结构。人们从一些流域的退水曲线分析中发现有多于两种的径流成分存在：在一些表层土壤十分疏松、下渗



能力很大的地区,即使降雨强度不够大,也可以观测到地面径流现象。这些现象为经典的 Horton 产流理论所不能解释。从 20 世纪 60 年代起 Hewlett 就开始注意到这个问题。直到 70 年代初, Kirkby 等在大量水文实验研究基础上提出了一种新的产流理论,称为山坡水文学产流理论。

山坡水文学产流理论揭示了蓄满产流的机制。在两种透水性有差别的土层,形成的相对不透水界面上,可形成临时饱和带,其侧向流动即成为壤中径流;如果该界面上土层的透水性远远好于其下面土层的透水性,则随着降雨的继续,这种临时饱和带容易向上发展,直至上层土壤全部达到饱和含水量,这时如仍有降雨补给,则将出现地面径流现象。这样产生的地面径流有别于超渗地面径流,故称为饱和地面径流。山坡水文学产流理论使得人们对自然界复杂的产流现象有了更深入的认识,是对 Horton 产流理论的重要补充。

### 3. 界面产流

剖析超渗地面径流、地下水径流、壤中水径流和饱和地面径流等 4 种基本径流成分的产生机制,可以发现任何一种径流成分都是在两种不同透水性介质的界面上形成的。这就是所谓界面产流规律。此时,如果将界面作为下渗面,则任何径流量都是这样界面的“超渗量”;但如果着眼于界面以上土层的水量平衡,则可以得知任何径流量都是该水量平衡方程式中的“余额”。

现有产流机制的主要不足是,忽略了地形坡度和上层各向异性对产流的影响,对非饱和侧向流在壤中流和地下水形成中的作用也注意不够。关于地形坡度对产流的影响,1981 年, Zaslavsky 曾引用过这样一个例子:若用下渗能力作为指标来决定茅草是否可作为盖屋顶的材料,则必定会作出由于其下渗能力太大而不宜作盖屋顶材料的结论。但事实上,人们并未发现雨水透过茅屋顶漏入室内。究其原因,是由于茅屋顶不仅具有陡峻的坡度,而且具有各向异性,即垂直于茅屋顶方向的渗透性远小于平行于茅屋顶方向的渗透性。可以认为,对地形坡度、土层各向异性及非饱和侧向流的作用进行深入的实验和分析,将会有力地推动对产流机制的进一步研究。

#### 2.2.1.2 流域产流分析

降落在流域上的雨水,经产流机制的作用,有一部分将通过流域出口断面流出,这便是流域产流量。在降雨过程中,流域上产生径流的区域称为产流区,其面积称为产流面积。流域产流面积的大小及位置在降雨过程中是变化的,这是流域产流的一个重要特点,对其变化规律的揭示和定量描述,是流域产流量定量计算的关键。

据观察,流域产流面积的变化过程一般可描述如下(图 2.2.1):降雨开始前,河流中的水量主要来自流域中包气带相对较厚的中、下游地区的地下水补给,在流域上游地区,由于土层浅薄,一般是无地下水补给枯季径流的。降雨开始后,流域中易产流的地区先产流,这时河沟开始向上游延伸,河网密度开始增加。随着降雨的继续,河网密度不断增加,产流面积不断扩大,组成了流域出口断面涨洪段不同时刻的流量。降雨停止后,流域中河网密度逐步减小,河中流量处于消退阶段。

流域产流面积的变化显然取决于降雨特性和下垫面特性空间分布的不均匀性及其配合关系。这里涉及的降雨特性主要是降雨量和降雨强度,涉及的下垫面特性主要是包气带厚度、土