



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水文学原理

四川大学 缪韧 编

Higher Education



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水文学原理

四川大学 缪韧 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是水文学与水资源工程专业的专业基础课教材,也是水文学与水资源工程本科专业最重要的核心课程教材。全书共分15章,主要内容有:绪论,河流和流域特征,降水,植物截留与填洼,土壤水,下渗,蒸发与散发,产流机制研究,流域产流,河槽洪水演算,流域汇流,湖泊与水库,冰川与融雪径流,数字流域,数字水文。

本书不仅适用于水文学与水资源工程专业本科“水文学原理”课程教学使用,也可作为需要学习“水文学原理”课程的地学类、水利水电类、国土资源与环境类、农业和林业类相关专业的本科教材,对需要了解水文学知识的各专业研究生和科技人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

水文学原理/缪韧编. —北京:中国水利水电出版社,
2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5084-4909-8

I. 水… II. 缪… III. 水文学—高等学校—教材 IV. P33

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第123977号

书 名	普通高等教育“十一五”国家级规划教材 水文学原理
作 者	四川大学 缪韧 编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 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
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 13.25印张 314千字
版 次	2007年9月第1版 2007年9月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	22.50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

本教材是根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材编制计划编写完成的，编写过程中得到了中国水利水电出版社的关心和支持。

《水文学原理》是水文学与水资源工程专业的专业基础课教材，也是水文学与水资源工程本科专业最重要的核心课程教材。编写时照顾到了地学类、水利水电类、国土资源与环境类、农业和林业类相关专业的需要，使教材自成体系，只需要有本科高等数学知识就可学习本教材。因此，本书不仅适用于水文学与水资源工程专业本科“水文学原理”课程教学使用，也可作为需要学习“水文学原理”课程的地学类、水利水电类、国土资源与环境类、农业和林业类相关专业学生的本科教材，对需要了解水文学知识的各专业研究生和科技人员也有参考价值。

本书取材广泛，内容通俗易懂，是在广泛参考前人教材的基础上，吸收了水文学的最新发展成果汇集而成的。编写时对水文学的核心内容做了提炼，对涉及自然地理学的概念从水文学的角度做了界定，增加了地理信息系统、数字水文等新内容。章节安排前后照应，内容安排上先易后难，先具体、后抽象，使教材富有逻辑性。

研究生徐尧、宋莉莉参加了书稿的整理和内容的讨论，并对全书进行了校对，书中全部插图也是由他们绘制完成的。因此，本书也倾注了两位研究生的辛勤劳动和他们对水文学的挚爱。

编 者

2007年6月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水文现象及水文学的研究内容	1
第二节 水文现象的基本特性及研究	2
第三节 水分循环与水量平衡方程	4
第四节 水文学的发展	8
第二章 河流和流域特征	11
第一节 河流及特征	11
第二节 流域与水系特征	14
第三节 径流形成过程概述	17
第四节 影响径流的主要因素	20
第五节 流量过程及其组成	22
第六节 径流的表示方法和度量单位	23
第七节 河川径流情势及我国河川径流分布	24
第三章 降水	27
第一节 降水的类型及时空分布	27
第二节 降雨量的计算及降雨资料的分析插补	33
第四章 植物截留与填注	42
第一节 植物截留	42
第二节 填注	45
第五章 土壤水	48
第一节 土壤的水理特性	48
第二节 土壤水分的作用力和土壤水分存在形式	49
第三节 土壤水的水力特性	52
第四节 土壤水运动的基本方程	54
第五节 土壤含水量的测定	58

第六章 下渗	60
第一节 下渗的物理过程	60
第二节 下渗理论和下渗公式	65
第三节 下渗实验与分析	71
第七章 蒸发与散发	74
第一节 水面蒸发	74
第二节 土壤蒸发	79
第三节 植物散发	82
第四节 流域蒸散发	85
第五节 我国蒸散发分布规律	87
第八章 产流机制研究	89
第一节 包气带水分补排及水量平衡方程	89
第二节 产流机制	91
第三节 产流类型和产流模式	95
第九章 流域产流	99
第一节 山坡流域的分类	99
第二节 流域产流模式和产流特征	99
第三节 流域上产流面积的变化与发展	101
第四节 蓄满产流模式的产流计算	103
第五节 超渗产流的产流量计算	107
第六节 总径流量的划分	110
第十章 河槽洪水演算	113
第一节 河槽洪水波概念	113
第二节 洪水波的分类和运动特征	116
第三节 河段槽蓄原理和槽蓄方程	120
第四节 洪水波的特征河长演算法	123
第十一章 流域汇流	132
第一节 概述	132
第二节 地面径流成因公式	134
第三节 流域汇流系统分析	135
第四节 流域汇流计算方法	139
第五节 线性分散流域汇流模型	145
第十二章 湖泊与水库	148
第一节 湖泊、水库的形成与形态特征	148
第二节 湖水的物理、化学性质	150
第三节 湖水运动及湖泊水库水量平衡	150

第四节	湿地水文	155
第十三章	冰川与融雪径流	160
第一节	冰川	160
第二节	积雪与融雪径流	162
第三节	森林水文	164
第十四章	数字流域	168
第一节	地理信息系统介绍	168
第二节	数字高程模型 (DEM)	175
第三节	数字流域特征计算	178
第十五章	数字水文	183
第一节	分布式流域水文模型概述	183
第二节	MIKESHE 模型	186
第三节	SWAT 模型	192
第四节	TOPMODEL 模型	197
参考文献		202

第一章 绪 论

水文现象是指自然界中水的运动变化和存在状态的现象。水是人类生存环境中必不可少的要素，与人类的生活和生产活动息息相关，因此，水文现象是自然界中十分重要的现象。研究水文现象的目的是为了更好地认识自然和利用自然。在全球水资源可利用量日益匮乏的今天，为了合理地利用和开发地球上的水资源，研究水文现象的规律就显得更为重要。

第一节 水文现象及水文学的研究内容

一、水文现象

水文学是研究地球上各种水体的一门科学。水体是指以一定形态（气态、液态、固态）存在于自然界中的水的总体，包括大气中的水汽，地面上的河流、湖泊、沼泽、海洋、冰川，地面以下的地下水等。

地面与地表：地面指地球大地固体表面；地面（包括地面本身）与大气之间的所有物体的集合称为地表。地面没有厚度，地表则是一个立体。因此，森林、河流、湖泊、沼泽、海洋都是地表的要素。

地球上的水主要受太阳辐射和地心引力两种作用而不停地运动，其表现形式可概括为四大类型，即降水、蒸发、渗流和径流，统称为水文现象。降水的形式有雨、雪、雾、霰、雹等，凡空气中的水汽以任何方式冷凝并降落在地表的都属降水。蒸发则是地表向空中散发水分，这种使水上升成为水汽的途径有植物截留蒸发、植物叶面散发、地面蒸发、陆地水面蒸发和海洋蒸发等5种。

所谓植物截留蒸发是指那些并未落到地面而被植物截留了的降水被蒸发的现象；所谓植物叶面散发是指从植物叶孔中逸出水汽的现象，有时也称为蒸腾，其本质上是土壤中的水分通过植物根系吸收，再通过枝干输送，最后经植物叶孔散发而进入空气中。

渗流是水从地表渗到地下，以及在地下土壤及岩石孔隙中流动的水流。渗流可分为两步：下渗（或入渗）是指地表水经过土壤或破碎岩石表面进入地下的过程；渗透是指水分在土壤及岩石孔隙内的运动。

径流是指大气降水到达陆地地表上，除掉蒸发而余存在地表或地下的流动水流，径流最终可以汇入河槽、湖泊和水库。径流因降水形式和补给来源的不同，可分为降雨径流和融雪径流，我国大部分河流以降雨径流为主。渗流和径流的概念内涵有交叉，以渗流形式在土壤中流动的水流，最终能够到达河槽、湖泊和水库的水流也是径流。

从陆地地表和地下汇入河槽后，向流域出口断面汇集的水流称为河川径流。河川径流



按其来源分为地面径流、壤中流和地下径流三种。地面径流又称地表径流，是指在地面上流动的水流，包括坡地漫流和河槽水流；壤中流是水分在土壤中沿土层坡度倾向流动的水流；地下径流是水在地下含水层内流动的水流。壤中流又可分为快速壤中流和慢速壤中流，前者在近地面的表层土壤中流动，速度接近地面径流，后者在较深的土层中流动，速度接近地下径流。在各种水文现象中，和人类经济活动关系最密切的就是河川径流，是水文学研究的主要对象。

水文现象是指上述水体的形成、运动、分布及相互之间的联系和转化这些有关水的现象；因此，水文学的研究内容十分广泛，形成了水文气象学、陆地水文学、海洋水文学、地下水水文学等许多分支学科。

二、水文学研究的内容

水文学研究地球上各种水体数量的形成、运动、分布规律及相互之间的联系和转化，同时也研究各种水体的物理和化学性质。因此，水文学的研究内容十分丰富，随着水文学的发展，逐渐形成了研究重点和研究对象各有侧重的水文学分支。这些分支按研究的水体不同，可分为以下学科。

(1) 水文气象学。主要研究大气中水分的形成、水汽的输送及分布规律。

(2) 地表水文学。地表水文学又分为海洋水文学和陆地水文学两大类。

1) 海洋水文学。主要研究海水的物理性质、化学性质、海水的运动和各種海洋现象的发生、发展规律及其内在联系。海水的物理化学性质包括温度、盐度、密度、水色、透明度等；海洋现象包括洋流、潮汐、波浪、泥沙等。

2) 陆地水文学。主要研究大陆表面上各种水体的水文现象，按研究水体的不同又可分为：①河川水文学；②湖泊（水库）水文学；③沼泽水文学；④冰川水文学；⑤河口水文学。

(3) 地下水文学。又称水文地质学，主要研究地壳表层内地下水的形成、分布与运动规律及其物理化学性质。

一般狭义的水文学是指陆地水文学。水文气象学、海洋水文学、水文地质学通常有专门的学科进行研究。本课程基本上是研究陆地水文的水文现象和原理，重点是与人类生活和生产关系最为密切的河川水文学，对于湖泊、沼泽、冰川等水体的水文现象，仅作简要介绍。

水文学原理主要是研究河流、湖泊、冰川、地下水、河口等水体（其中主要是河流）的水文现象和水文规律，以水文循环为核心、河流水文规律为重点，阐明水文循环各要素和水文现象的物理机制和相互转化关系及其时空变化规律。

第二节 水文现象的基本特性及研究

一、水文现象的基本特性

水文现象受气候和自然地理因素的综合影响，处于不断的运动变化之中，而这些因素的组合和变化决定了水文规律变化的基本特点。这些基本特点可归纳为以下两个方面。



1. 水文现象时程变化的周期性与随机性的对立统一

所谓周期性是指水文现象的过程，大致以某一时段为循环周期。如河流的水量变化，在一年之中有丰水期、枯水期，尽管各年的总水量有大有小，但各年水量变化的丰枯交替过程是相似的，一般河流均有以年为时段的周期。例如，河流每年最大和最小流量的出现虽无固定的时日，但最大流量每年都发生在多雨的汛期，而最小流量多出现在雨雪稀少的枯水期，这是由于四季的交替变化是影响河川径流的主要气候因素。又如，靠冰川或融雪补给的河流，因气温具有年变化的周期，所以随气温变化而变化的河川径流也具有年周期性，其年最大冰川融水径流一股出现在气温最高的夏季7、8月。有些人在研究某些长期观测的资料时发现，水文现象还有多年变化的周期性。

所谓随机性是指水文现象的（某一固定长度，例如年）过程，不会完全一样。如河流每一年的流量变化过程，实际上不会完全重复，每年的最大与最小流量的具体数值也各不相同，这些水文现象的发生在数值上都表现为随机性，也就是带有偶然性。这是因为影响河川径流的因素极为复杂，各因素本身也在不断地发生着变化，在不同年份的不同时期，各种因素间的组合也不完全相同，所以，受其制约的水文现象的变化过程，在时程上和数量上都没有重复再现过，都具有随机性。

2. 水文现象地区分布的相似性与特殊性的对立统一

不同流域所处的地理位置如果相近，气候因素与地理条件也相似，由其综合影响而产生的水文现象在一定范围内也具有相似性，表现在地区的分布上有一定规律。如在湿润地区的河流，其水量丰富，年内分配也比较均匀，而在干旱地区的大多数河流，则水量不足，年内分配也不均匀。又如，同一地区的不同河流，其汛期与枯水期都十分相近，径流变化过程也都十分相似。

另一方面，相邻流域所处的地理位置与气候因素虽然相似，但由于地形地质等条件的差异，从而会产生不同的水文变化规律。这就是与相似性对立的特殊性。如在同一地区，山区河流与平原河流，其洪水运动规律就各不相同；地下水丰富的河流与地下水贫乏的河流，其枯水水文动态就有很大差异。

由于水文现象具有时程上的随机性和地区上的特殊性，故需要对各个不同流域的各种水文现象进行年复一年的长期观测，积累资料，进行统计并分析其变化规律。又由于水文现象具有地区上的相似性，故只需有目的地选择一些有代表性的河流设立水文站进行观测，将其成果移用于相似地区即可。为了弥补观测年限的不足，还应对历史上和近期发生过的大暴雨、大洪水及特枯水等进行调查研究，以便全面了解和析水文现象周期性、随机性的变化规律。

二、水文现象的研究方法

由上述水文现象的基本特征可知，对水文现象的分析研究，都要以实际观测资料为依据。按不同目的要求，可把水文学常用的研究方法归结为成因分析法、数理统计法和地理综合法三类。

(1) 成因分析法。根据水文站网和室外、室内试验的观测资料，从物理成因出发，研究水文现象的形成过程，以阐明水文现象的本质及其内在联系，揭示水文现象的成因规律，建立水文现象各要素间的定性或定量关系。成因分析法建立在水文过程的物理基础之



上,比之单纯用经验方法或统计方法更具科学性。但由于影响水文现象的因素极其复杂,其形成机理还不完全清楚,因而本法在定量方面仍然存在着很大困难,目前尚不能完全满足人类生产活动的需要。

(2) 数理统计法。基于水文现象具有的随机特性,可以根据概率理论,运用数理统计方法,处理长期实测所获得的水文资料,求得水文现象特征值的统计规律,为工程规划、设计提供所需的设计水文数据。这种方法是根据过去与现在的实测资料来统计外推水文现象未来的变化,而不去阐明水文现象的因果关系。如果本法与物理成因法结合起来运用,可望获得比较满意成果。

(3) 地理综合法。由于气候因素和地形地质等因素的分布具有地区特征,从而使水文现象的变化在地区的分布上也呈现出一定的规律性。因此,可建立水文现象的地区性经验公式,也可与地图结合在一起绘制水文特征的等值线等,以分析水文现象的地区特性,揭示水文现象的地区分布规律。自然地理相似的流域,其水文现象和水文特征也相似,可以将一个地区的水文特征值直接移用于另一个地区,这种方法通常称为水文比拟法,也属地理综合法。地理综合法特别适用于无资料(或资料不全)地区的各种水文分析计算及水资源评价任务。另外,在水文站网布设时,如果充分考虑水文现象具有地带性规律的特点,则可以用最少的测站观测到的资料,去解决各种自然地理特点相同流域的水文分析和计算问题。

在解决实际问题时,以上三类方法常常同时使用,相辅相成、互为补充。经过多年实践,我国已初步形成一种具有自己特点的研究方法,概括为“多种方法、综合分析、合理选定”的原则。我们在使用时,应根据工程所在地的地区特点,以及可能收集到的资料情况,对采用的方法有所侧重,以便为工程规划设计提供可靠的水文依据。

第三节 水分循环与水量平衡方程

一、地球上水的分布及储量

地球上的地理圈是由大气圈、水圈、岩石圈和生物圈所构成。地球表面的岩石、土壤、水和植被等构成了大气圈的下垫面,也可以说下垫面是不同性质的地球表面,如陆面、水面、雪面等的统称。水圈包括地球上所有形式的水,主要有地面水、地下水、大气水和生物水四大部分。地面水包括海洋、湖泊、河流、冰川、沼泽等水体储存的水,它是地球上水量的主要组成部分;地下水通常指地面以下地壳表层中储存于土壤和岩层裂隙中的水;大气水是指地球大气层中的水汽;生物水是指地球上一切生物有机体内的水分。

根据联合国(1978年)有关文件提供的资料,地球上水的总量为13.86亿 km^3 。海洋中的水量为11.37亿 km^3 ,占地球总水量的86.5%,可见海洋聚集了地球上水量的绝大部分。据估算,地球上全部河流、湖泊及沼泽的总水量约为19万 km^3 ,占地球总水量的0.014%,这部分水与人类生产关系最为密切,是水文学的主要研究对象。大陆冰川与永久雪盖总水量约为2406万 km^3 ,占地球淡水总量的68.7%,为地球上最大的淡水水体,但目前尚难以开发利用。地下水(重力水和毛管水)中的淡水储量约为1053万 km^3 ,占地球总淡水量的30.1%,其中相当一部分可开发利用,是人类生产生活所需淡水资源

的重要来源之一。地球大气层中的水汽总量为 1.29 万 km^3 ，占淡水储量的 0.04% ，其量虽不多，但却是各种水体中最活跃的一个因素。大气水因降水而减少却又通过各种水体的蒸发而得到补充，在一定时段内保持动态平衡。大气中的水汽更替周期相当短，平均只有 8 天。

二、自然界的水分循环

地球上的各种水体，在太阳辐射的作用下，不断地因蒸发而变成水汽进入大气，再由气流的水平输送和上升凝结形成降水，落回地面或海洋。落到地面的雨水，一部分蒸发返回大气，另一部分以地面径流和地下径流的形式注入海洋。自然界中水分不断蒸发、输送和凝结，形成降水、径流的循环往复过程，称为水文循环。水文循环对人类的生存和各项生产活动具有重大的意义，正是由于水分循环，才提供了江河、湖泊等水体的淡水资源，以及江河的水能资源。水文循环过程如图 1-1 所示。

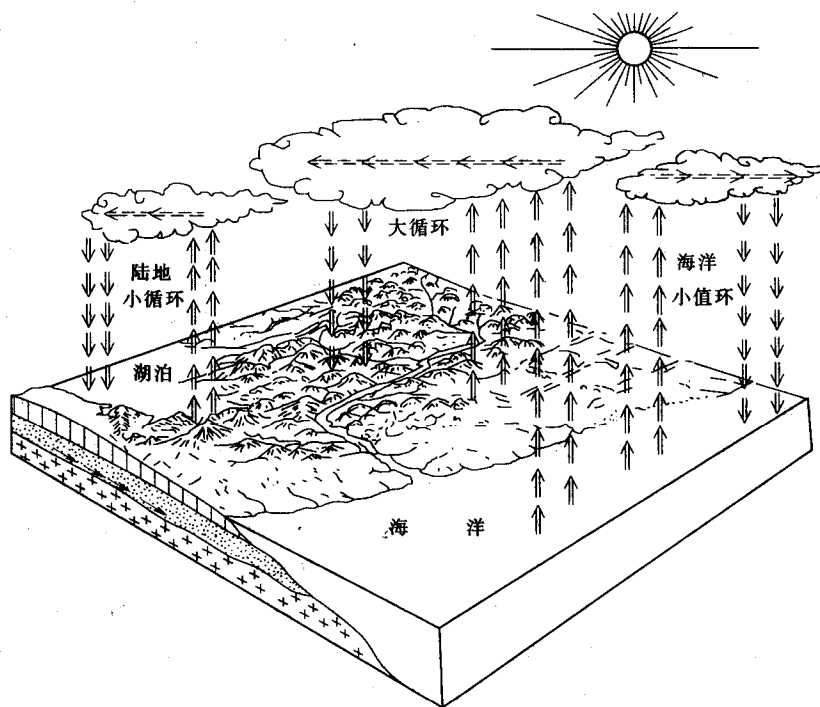


图 1-1 自然界的水分循环示意图 (引自文献 [1])

水分循环的能量是太阳辐射。水在自然界中循环的路径极其复杂，且不断地变化。大气环流机制和海陆分布决定了地球上大气水汽的运行规律，而地表的植被、地形、地貌性质和地面以下的土壤及地质情况则决定了地表、地下径流的运动规律。水分循环的范围贯穿整个水圈，向上延伸到 10km 左右，下至地表以下平均 1km 深处。根据水分循环过程的整体性和局部性，可把水分循环分为大循环与小循环两类。由海洋蒸发的水汽降到大陆后又流归海洋的循环，称为大循环；海洋蒸发的水汽凝结后成为降水又直接降落在海洋上或者陆地上的降水在没有流归海洋之前，又蒸发到空中去的这些局部循环，称为小循环。



陆地上小循环之所以重要, 在于地方性蒸发所产生的水汽, 既增加了当时大气中的水汽含量, 又改变了大气的物理状态, 因此创造了降水的有利条件, 直接影响到人类的经济活动。

研究水分循环的目的, 在于认识水分循环的客观规律, 了解水分循环各项影响因素的内在联系, 为改造自然和利用自然, 开发利用水利、水能资源提供理论根据。

三、影响水分循环的因素

影响水分循环的因素很多, 可以归纳为 4 类: ①气象因素, 如温度、风速、风向、湿度等; ②自然地理条件, 如地形地貌、地质构造、土壤和植被情况等; ③人类活动, 包括各种水利措施和农业措施等; ④地理位置。

在以上 4 类因素中, 气象因素是起主导作用的因素。因为在水分循环的 4 个环节中有 3 个(蒸发、水汽输送、降水) 取决于气象条件。径流虽受地形地貌、地质构造、土壤和植被等下垫面条件的影响, 但径流的形成及其时空变化在很大程度上仍取决于气象条件。自然地理条件主要是通过蒸发和径流来影响水分循环的, 有利于蒸发的地区, 水文循环活跃, 而有利于径流的地区, 不利于水分循环。人类活动对水分循环的影响, 主要表现在调节了径流, 加大了蒸发, 增加了降水等水分循环环节上, 总之, 人类活动是通过改变下垫面性质, 进而影响水分循环各环节的。

四、我国水分循环的路径

由于我国的地理位置以及与各大洋的相对位置关系, 使我国受到的大气环流和季风的影响情况, 决定了我国的水汽来源为太平洋水汽源地、印度洋水汽源地、大西洋水汽源地、北冰洋水汽源地和鄂霍次克海水汽源地, 相应的形成了我国五大水分循环系统。

(1) 太平洋水分循环。我国有相当长的海岸线濒临太平洋, 由于太平洋中的海洋暖流流经我国东南沿海, 暖流洋面温度高, 蒸发旺盛, 洋面上空的暖湿空气受东南季风和台风的影响, 大量向内陆输送。进入大陆后, 又与西伯利亚冷空气团交锋, 成为华东、华北地区的主要降水。降水分布从东南沿海向西北内陆递减, 我国的主要河流如长江、黄河、淮河、珠江和浙、闽、台的河流其水源主要来自这一循环的降雨, 这些河流均注入太平洋。

(2) 印度洋水分循环。印度洋是我国南方主要水汽来源之一。冬季有明显湿舌从孟加拉湾延伸向我国的西南部, 形成这一地区的冬季降水; 夏季由于印度洋低压的发展, 盛行西南季风, 把大量的水汽输送到我国西南、中南、华东以至河套以北地区, 成为我国夏季的主要降水源泉。所形成的降水, 一部分由西南地区的一些河流, 如雅鲁藏布江、怒江等汇入印度洋; 另一部分降水还参与了太平洋的水分循环。

(3) 内陆水分循环。我国西北新疆内陆地区的水分循环, 主要是内陆水分循环系统, 其西去太平洋甚远, 但由于高空西风疾行, 地势平坦, 仍有少量大西洋水分于春季随气旋东来, 参与内陆水分循环。

(4) 北冰洋水分循环。北冰洋水汽借强盛的北风随西伯利亚气团进入我国西北。当西伯利亚气团强盛时, 也可深入我国腹地, 但其水汽含量很少, 引起的降水量并不多。流入北冰洋的河流有额尔齐斯河。

(5) 鄂霍次克海水分循环。鄂霍次克海和日本海的湿冷气团, 在春夏之间随东北季风遁入我国东北部地区, 形成降水后转换成的径流, 经黑龙江注入鄂霍次克海。



此外，华南地区受热带辐合带的影响，可把南海的水汽输送到华南地区，形成降水后经珠江流入南海。

五、水量平衡原理和方程

水量平衡是物质不灭定律在水文学中的具体表现，它是研究水文现象的基本工具。自然界的水分循环，从长期来看，大体上是不变的。从海洋蒸发出来向陆地输送的水分经过降雨，以径流的形式又回到海洋。根据物质不灭定律可知：对于任一区域，在任意时段内，来水量等于出水量与区域内蓄水变量之和，即水分循环过程中应收支平衡，这就是水量平衡原理。根据此原理可以列出水量平衡方程式，用水量平衡方程式可对水文循环建立定量关系，从而了解水文循环要素，如降水、蒸发、径流之间的数量关系，这对于水资源评价、水文水利计算、水文预报都具有重要意义。例如，在已知某些要素条件下，推求另一未知的要素，比如已知径流量和降水量，推算蒸发量、下渗量等。在水文分析计算中，还常常通过水量平衡来确定并消除某些要素在测定中的可能误差以及评估计算成果的精度。

1. 地球的水量平衡

海洋和陆地上，在多年平均情况下，水量并无明显的增减趋势。对于海洋，多年平均蒸发量 \bar{Z}_o 等于多年平均降水量 \bar{P}_o 与（从河流流入的）多年平均径流量 \bar{R}_o 之和，其平衡方程式为：

$$\bar{Z}_o = \bar{P}_o + \bar{R}_o \quad (1-1)$$

对于陆地，多年平均降水量 \bar{P}_c 等于多年平均蒸发量 \bar{Z}_c 与（从河流流出的）多年平均径流量 \bar{R}_c 之和，平衡方程式为：

$$\bar{P}_c = \bar{Z}_c + \bar{R}_c \quad (1-2)$$

将上两式相减，注意 $\bar{R}_o = \bar{R}_c$ ，即得全球的水量平衡方程式：

$$\bar{P}_o + \bar{P}_c = \bar{Z}_o + \bar{Z}_c \quad (1-3)$$

此式表明，海洋与陆地的蒸发量，等于降落在海洋与陆地上的降水量。

2. 通用的水量平衡方程式

为写出通用的水量平衡方程式，今划出地面的某一部分作为研究对象。这部分地面具有湖泊、沼泽等水体，并纵横交错着许多进出水道，沿这块地面的边界想象地做出一个垂直的柱体，柱体底部为地面以下某一深度的水平面，假设该水平面上下的水量不进行交换。根据水量平衡原理可知：在某一定时段内，进入此柱体内的水量，减去自该柱体流出的水量，应当等于该柱体内的蓄水变量。

水量平衡的收入部分，包括下列各项：①时段内的降水量 P ；②时段内的凝结量 X ，指水分蒸发至空中凝结，尚未变成降水的水分；③由河流流入的径流量 $\sum R_{地面,入}$ ；④由地下流入的径流 $\sum R_{地下,入}$ ；⑤柱体内时段初的蓄水量 $W_{初}$ 。

支出部分包括下列各项：①陆地（土壤、植物）蒸发及水面（包括冰面、雪面）蒸发 E ；②由河流流出的径流量 $\sum R_{地面,出}$ ；③由地下流出的径流量 $\sum R_{地下,出}$ ；④柱体内时段末的蓄水量 $W_{末}$ ；⑤用水量 Y ，包括灌溉用水量、工业用水量，外流域引水量及其他用水量，这部分水量除外流域引水量外，均有部分水量回归区域河槽，因此，它们指的是净耗



水量。

上列各要素都以水深单位 mm 表示。由此可以得出任意范围的地区在任意时段的通用水量平衡方程式如下：

$$P + X + \sum R_{\text{地面,入}} + \sum R_{\text{地下,入}} + W_{\text{初}} = E + \sum R_{\text{地面,出}} + \sum R_{\text{地下,出}} + Y + W_{\text{末}} \quad (1-4)$$

3. 流域水量平衡方程

对于一个天然流域，如果地面分水线与地下分水线一致（称为闭合流域），则不可能有水从外流域经地面或地下流入，如果将时段内的凝结量计入蒸发，即 E 认为是净蒸发，于是，闭合流域给定时段的水量平衡方程可写为：

$$P = E + R_{\text{地面}} + R_{\text{地下}} + Y + W_{\text{末}} - W_{\text{初}} \quad (1-5)$$

对于非闭合流域，上式中应计入与相邻流域的交换水量 Z 。

第四节 水文学的发展

水文学与其他自然科学一样，是在人类生活需要和生产实践的推动下发展起来的。经历了由萌芽到成熟，由定性到定量，由经验到理论的发展过程。

1. 萌芽时期

古代的人们为了利用河流灌溉，需要掌握河水消退规律，由此开始了原始的水位、流量和水流特性的观察。公元前 3500~前 300 年，埃及人因灌溉引水对尼罗河水位进行了观测，至今在崖壁上还保存有公元前 2200 年所刻的水尺。公元前 2000 多年，我国人民为了防止黄河洪水灾害，就开始注意对水位和天气状况的观察；2000 多年前，我国人民就善于因势利导，兴利除害，引岷江之水灌溉天府之国，分水内江、外江消除蜀国水患，建成的都江堰至今仍发挥着巨大的效益。

2. 奠基时期

水文学逐渐形成一门学科是在 14~16 世纪，随着各种水文仪器的出现，以及水力学、气象学的发展，才逐渐奠定了水文学的稳固基础，从而使水文学成为一门系统的科学。如毕托管、瓦尔德曼流速仪的出现，水力学中的伯努利定律、谢才公式、达西定律、曼宁公式的提出等。这些都为研究水流运动提供了观测数据和计算基础。1674 年，法国人 P. 佩罗（1608~1680 年）第一次根据塞纳河观测的降雨和径流资料，计算出塞纳河在伯格底以上流域的年径流量是年降水量的 1/6，这是人们第一次建立的年降雨量和年径流量之间的定量关系。这一结论的公布，被认为是现代水文学的开始。

3. 发展时期

这一时期指 1900~1950 年。其特点是水文学逐渐形成一门系统的学科。随着人们对水文规律的深入研究，水文学在生产实践中逐渐得到广泛的应用，并推动水文学向现代化方向发展。由于水利、水电、交通事业的大量发展提出了许多水文问题，从而大大推动了工程水文学的发展；由于防洪和工程管理运行的需要，促进了水文预报和水文计算工作的发展；为了满足水文计算和水文预报对水文资料的需求，水文站网也得到了发展。这一时期，水文学除了应用传统的水文相关公式和经验公式之外，还相继出现了结合成因分析的



水文预报和水文计算方法,如用于洪水计算的推理公式和相关因数预报方法等;同时对水文过程的物理机制进行观测、实验研究及深入分析,提出了如谢尔曼单位线、霍顿下渗理论、海森和耿贝尔水文统计理论等。白纳德关于水文气象学的研究成果、爱因斯坦提出的泥沙推移理论等都属这一阶段的重要理论成果。

4. 现代化时期

这一时期指 20 世纪 50 年代至今。一方面,由于水文科学理论的深入发展和其他学科的渗透,如概率论与统计学、计算数学、系统工程学、现代气象学等与水文学的结合,使得水文计算和水文预报领域出现了许多新的方法和理论。另一方面,由于计算机的应用和现代通信、遥感、遥测等新技术的应用,使水文学进入了现代化时期,如各类水文模型的提出、最大降水的估算、水文资料的计算机存储和检索系统的出现等,标志着现代水文学的形成。同时,这一时期也形成了一些新的水文学分支学科,如随机水文学、城市水文学、农业水文学、环境水文学等。20 世纪后期水文科学的发展出现了新的形势:首先,由于新技术特别是计算机的应用,使水文信息(实时资料)的获取、传递和处理更加方便迅速,节省了大量人力和时间,自记雨量仪、自记水位计、多普勒超声波自动测流仪以及水情测报系统的大量应用开辟了水文测验和洪水预报的新局面。其次,由于工农业和城市建设的需要,应用水文学得以迅速发展。三是由于生产和生活用水的增长,环境污染日趋严重,出现了水资源紧张局面,迫使水文学特别侧重于水资源研究,不仅注重水量还要注重水质;不仅注重洪水,还要注重枯水;不仅研究一条河流、一个流域的水文特性,还要研究跨流域、跨地区的水资源联合调度问题;不仅要研究短期、近期的水文预报,还要研究长期的水文趋势预估。从此,水文科学进入了一个现代化的新时代。

美国 1971 年建立了水文资料库,能够在各州计算机终端上获得全美任一地点的资料。20 世纪 80 年代前期先后发射了 4 颗陆地卫星,取得了许多水文研究成果,并为国际服务。美、英和挪威等国采用测深仪直接绘制断面图。这一时期,中国水文站网发展迅速,全国基本站达 21600 处,可以基本掌握全国各主要河流的水文情势;在长江、黄河等流域开始应用卫星图片和遥感技术研究水文和水资源问题。

20 世纪 50 年代,随着电子计算技术的发展,出现了许多水文数学模型,为水文科学的进一步发展开创了新途径。1966 年美国林斯雷和 N. H. 克劳福法提出的斯坦福流域模型和美籍华人周文德在 20 世纪 60~70 年代提出的流域水文模型以及一系列的水文随机模型、系统模型、分布式水文模型等,推动了水文预报和水资源系统分析的发展。中国水文预报自 20 世纪 50 年代初开始,也提出了具有中国特色的洪水预报方法。

这一时期,除广泛调查历史洪水外,20 世纪 90 年代还发展了古洪水研究,利用放射性同位素碳十四获得约距今 10000 年以来的古洪水资料,它在长江三峡、黄河小浪底等水利枢纽工程洪水计算中的应用取得了巨大成果。20 世纪 70 年代以来,中国还相继编辑出版了《全国可能最大降水等值线图》和《全国暴雨参数等值线图》等,为中国的暴雨洪水研究和计算作出了贡献。

20 世纪 70 年代中期开展的国际水文合作,兴起了全球性的水文科学研究活动和国际水文十年(IHD)、世界气象组织(WMO)业务水文计划(OHP)、联合国教科文组织国际水文计划(IHP)等国际水文活动。广泛的国际合作,促进了全球水文、水资源知识交



流，推动了水文科学的发展。

随着现代空间对地观测技术及计算机技术的飞跃发展，遥感技术（RS）、全球卫星定位系统（GPS）和地理信息系统（GIS）与水文学的结合，使得数字流域模型和数字水文模型（分布式水文模型）的建立和应用得以实现。遥感技术、全球卫星定位系统为数字流域模型和数字水文模型提供了考虑空间变异性的分布式数据源，地理信息系统则为数字流域模型和数字水文模型的建立和应用提供了技术平台。分布式水文模型由于考虑了气象参数、流域下垫面地表土壤、岩石结构特性和植被组成等要素的时空变异性，因此，比之于集总式水文模型有更强的物理意义，成为当前水文学研究的热点。