

芮孝芳 著

水文学原理



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

SHUIWENXUE

YUANLI

水文学原理

芮孝芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书论述了水文学的基本理论和计算方法原理，内容包括：水文学研究方法的特点、水文循环、流域和水系、降水、土壤水运动、下渗、蒸发和散发、产流机制、地下水流、地表水流、洪水演算、流域产流、流域汇流、冰雪水文、水质及河流生态环境等。

本书体系新颖，内容丰富，概念清晰，写作严谨，语言流畅。可供从事水文水资源、水利工程、土木工程、农业水土工程、地理科学、环境科学等专业的科学工作者和工程技术人员参考，并可作为这些专业的大学本科生或研究生的必修课教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水文学原理/芮孝芳著. —北京: 中国水利水电出版社, 2004.8

ISBN 7-5084-2164-7

I. 水... II. 芮... III. 水文学 IV. P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 053082 号

书 名	水文学原理
作 者	芮孝芳 著
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 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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 24.75 印张 587 千字
版 次	2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	65.00 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

自序

当写完本书最后一章时，已是2003年晚春的深夜了。我推开书房的小窗，深深地吸了一口习习吹来的凉风，感到如释重负般的轻松。遥望夜色中的紫金山，我思绪万千，往事历历在目……

1958年，我从苏南小镇考入位于江苏省城南京的华东水利学院（河海大学在1952~1985年间使用的校名）河川枢纽及水电站建筑专业，入学两个月后我又被批准转入新办的海洋水文专业。1959年学校决定停办海洋水文专业。在无可奈何的情况下，我们全班同学只好选择了华东水利学院陆地水文专业。46年过去了，我已经从踌躇满志的青年时代步入年逾花甲的老年时代，从对水文学及水资源的完全无知变为将其作为自己所深爱的事业，从一个不乐意读水文专业的学生成为一名水文水资源战线的忠实老兵。我庆幸自己当年没有选错专业！

1963年我大学毕业后即留在母校从事水文学及水资源学科的教学和科学研究工作，1981年又被派往荷兰Delft大学国际水力及环境工程学院（IHE）留学一年。我有幸亲身经历了水文学及水资源学科发展的现代时期，亲眼目睹了它逐步成为经济社会可持续发展的支撑学科之一的历史过程。“只有水资源的可持续利用，才能保障经济社会可持续发展”和“水文学是水资源开发利用保护的科学基础”的科学论断正在日益深入人心。不可否认，水文学及水资源的研究有功利性的一面，但我更看重它的非功利性一面。学习和研究水文学已成为我生活中不可缺少的内容。“书山有路勤为径，学海无涯苦作舟”。这是我学习和研究水文学的一点体会。

本书体系和格局的形成深受母校深厚的学术底蕴之影响，从母校水文学及水资源学科厚实的学术沉淀中我吸取了丰富的营养。没有母校的长期培养，要形成本书是很难的。

河海大学校长张长宽教授、副校长朱跃龙教授、河海大学水资源环境学院院长任立良教授、副院长黄振平教授和我的同仁都十分关心本书的著述和出版，谨向他们表示衷心的感谢！同时衷心感谢河海大学“211”建设项目给予的资助！

尽管做了努力，但书中不足之处仍在所难免。恳望海内外专家学者、尊敬的读者和使用本书的大专院校师生随时批评指正！

谨以此书献给我的母校！

芮孝芳

2004年7月于河海大学

目录

自序

第一章 绪论	1
第一节 人类面临的主要水问题	1
第二节 水文学发展的回顾	3
第三节 水文学的主要分支学科	4
第四节 水文学研究方法的基本特点	6
第二章 水文循环	9
第一节 水的奇异物理性质	9
第二节 水文循环现象	10
第三节 水文循环的尺度	11
第四节 地球系统中的水及水平衡	12
第三章 流域和水系	18
第一节 基本概念	18
第二节 水系的拓扑学特征	20
第三节 水系的几何学特征	23
第四节 流域的形状特征	27
第五节 流域的结构特征	28
第六节 数字高程模型及应用	31
第七节 水系的随机模拟	34
第八节 水系的分形理论	40
第四章 降水	44
第一节 降水要素及其时空变化表示方法	44
第二节 降雨的类型及影响因素	49
第三节 区域(流域)平均降雨量计算方法	52
第四节 降雨资料的检验	55
第五节 雷达测雨	56
第五章 土壤水	58
第一节 土壤的质地和结构	58
第二节 土壤中的“三相”关系	59
第三节 土壤水的存在形态	61

第四节	土壤水的能量状态	66
第五节	土壤水运动的控制方程	71
第六章	下渗	76
第一节	下渗的物理过程	76
第二节	非饱和下渗理论	80
第三节	饱和下渗理论	89
第四节	经验下渗曲线	93
第五节	天然条件下的下渗	96
第六节	下渗后的土壤水分再分布	100
第七章	蒸发与散发	104
第一节	蒸发现象及其控制条件	104
第二节	水面蒸发	105
第三节	土壤蒸发	114
第四节	植物散发	122
第五节	流域蒸散发	126
第八章	产流机制	131
第一节	截留与填注	131
第二节	包气带及其结构	134
第三节	包气带水分动态及对降雨的再分配作用	137
第四节	产流的基本物理条件	143
第五节	组合产流的类型和基本产流模式	152
第九章	地下水流	155
第一节	含水层类型	155
第二节	含水层的水文特征	156
第三节	地下水运动的控制方程	158
第四节	地下水与地表水的关系	162
第十章	地表水流	168
第一节	洪水波运动	168
第二节	圣维南方程组	173
第三节	洪水波类型及其特征	178
第四节	圣维南方程组的线性化	186
第五节	槽蓄原理和槽蓄方程	190
第六节	枯水及退水规律	195
第七节	坡面水流运动	197
第八节	湖水运动	204
第十一章	洪水演算	212
第一节	线性扩散波演算法	212
第二节	线性运动波演算法	222

第三节	动力波演算法	230
第四节	线性特征河长连续演算法	240
第五节	断面流速分布演算法	245
第十二章	流域产流	249
第一节	山坡流域的分类	249
第二节	流域产流特征分析	252
第三节	产流面积的变化	255
第四节	蓄满产流的总径流量计算及水源划分	258
第五节	超渗产流的地面径流量计算	263
第六节	降雨径流相关图	264
第十三章	流域汇流	267
第一节	流域汇流现象	267
第二节	流域出口断面流量过程的推移和坦化	270
第三节	线性流域汇流系统分析	275
第四节	线性集总式流域汇流模型	285
第五节	线性分散式流域汇流模型	295
第六节	地貌瞬时单位线理论	300
第七节	线性地下水汇流模型	309
第八节	流域汇流的非线性问题	312
第十四章	冰雪水文	318
第一节	积雪	318
第二节	融雪径流	321
第三节	冰川的形成及运动	325
第四节	冰川的积累与消融	329
第五节	冰川径流	332
第六节	河流冰情	334
第十五章	水质及河流生态环境	350
第一节	“水质”的由来及本底水质	350
第二节	水污染的途径及污染源	352
第三节	水污染的主要类型及性质	353
第四节	水体的稀释扩散	357
第五节	污染物的源与汇	362
第六节	影响水体自净的因素	368
第七节	水质模型	370
第八节	河流生态系统的特点	378
第九节	人类活动对河流生态环境的影响	379
参考文献		383

第一章 绪 论



第一节 人类面临的主要水问题

水是人类最早接触到的自然物质之一。水作为一种自然物质，主要具有下列自然属性。

(1) 水借助于大气运动和蒸发、降水、径流等现象在由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈组成的地球系统中作周而复始的水文循环运动。地球上总水量虽大体不变，但每年的时空分布有所不同，甚至形成一些地方的洪水或干旱。

(2) 水良好的溶剂，许多物质都容易溶解于水。水流是重要的载体，坡面土壤的侵蚀与搬运、河流泥沙运动、水污染物质的迁移扩散都是在水流作用下进行的。没有水流，就不可能有坡面土壤流失、河道冲淤变化和水污染物质的迁移传播。

(3) 水具有势能、动能、压力能和化学能等，这是驱使水发生流动、溶解物质、携带泥沙和其他物质的动力。如果将水具有的能量设法集中起来，就可成为一种可再生的清洁能源即水能。

水与人类息息相关。水作为人类生存和经济社会发展不可缺少的自然资源，又具有如下社会属性。

(1) 水是维持生命的不可替代的物质，是生命之源，是地球系统的“血液”。水文循环就是地球系统的“血液循环”。水文循环导致的水的时空分布是地球上具有丰富多彩生态系统和美妙自然景色的根本原因之一。

(2) 水少可能引起缺水，甚至发生旱灾或水荒；水多可能引起洪涝，发生水灾；水污染可能引起环境恶化，有水不能用。旱灾、水灾和水污染是人类生活和生产对水的需求与水的自然属性不协调的结果。

(3) 水资源虽可再生，但有时空变化。因此，人类开发利用水资源一般需要一定条件。这是水资源有价值，也有其价值规律的主要原因所在。

(4) 如果处理不好，“争水”、“排洪”或“污染水体”可能引发河流上、下游之间、地区之间，甚至国家之间的尖锐矛盾，成为社会不稳定的一个因素。

人类经济社会的发展,从一定意义上说意味着人类向自然进行索取,如果这种索取不适当,则迟早会带来麻烦。人类面临的下列水问题就是这种麻烦的一些具体表现。

(1) 水、旱灾害是人类面临的主要自然灾害。人类与水、旱灾害做斗争已有几千年历史,但时至今日,水、旱灾害造成的损失仍位居诸自然灾害之首。据统计,在世界范围内每年因水、旱灾害造成的损失占各种自然灾害总损失的比例达 55%,其中水灾为 40%,旱灾为 15%。地球上的自然灾害主要分布在环太平洋和北纬 20°~50°两个带状区域内,全球 95% 的火山、95% 的地震、70% 的海啸都发生在这里,大部分水、旱灾害也集中在这里。中国大部分地区位于这两个灾害带内,每年因水、旱灾害造成的损失占各种自然灾害总损失的比例要大于 55%。中国目前受旱耕地超过 0.2 亿 hm^2 ,农田灌溉年缺水达 300 亿 m^3 ;中国 620 座城市中约有 300 座城市缺水,年缺水量约 58 亿 m^3 ,缺水已成为中国工农业生产发展的重要障碍之一。近半个世纪以来,中国江河大洪水和特大洪水的出现发生了一些值得注意的倾向:一是长江、淮河及其以南地区和东北的松花江、辽河流域,大洪水和特大洪水发生频次增加;二是“小流量高水位”现象时有出现;三是有些地方,同样的降雨量和过程产生的洪水比过去更大。长江、黄河的洪涝灾害仍是中华民族的心腹之患。

(2) 全球气候变暖增加了解决水问题的难度。人口的增加,工业的发展,导致二氧化碳等温室气体大量向大气排放,“温室效应”加剧,全球气候变暖,海平面上升,水文循环发生一些变化。全球气候变暖已对中国产生比较明显的影响:一是使中国一些地区降水量减少,如山西省汾河流域多年平均降水量已由过去的 558mm 减少到现在的 449mm,减少近 20%;二是使海平面明显上升,据分析,近百年来中国海平面平均每年上升了 0.14cm,其中天津、江苏、上海和广东沿海近百年海平面上升超过了 20cm。降水量减少加重了一些地区的干旱缺水,海平面上升加重了沿海地区和感潮河段的水灾。

(3) 水污染加剧的势头还未得到有效的控制。有很长一段时间,人们对保护水环境意识淡薄,走了一条“先发展经济,后治理环境”的路子,留下了许多环境方面的后遗症,目前仍有一些国家或地区水污染呈加剧趋势。中国工业企业的废污水排放量很大,而且约有 80% 以上未经处理就直接排入江河湖库等水体,已使得不少支流小河变成了排污沟;有的大江大河也出现了岸边污染带。水污染的加剧,不仅带来了严重的生态与环境问题,而且也增加了一些缺水地区和缺水城市的缺水程度,甚至出现缺乏安全饮用水的危机。

(4) 不合理的工程措施和管理产生了负面影响。盲目砍伐森林,不合理的筑坝拦水、围垦、跨流域调水、引水灌溉和开采地下水等,都有可能带来负面影响。对森林的乱砍滥伐,致使水土流失严重,恶化了当地生态与环境,造成了河道淤积,加之不合理的围垦,减少了水体的调蓄能力和输水能力,从而降低了江河防洪标准。过量地开采地下水,会出现区域性地下水漏斗,引发地面沉降和海水入侵,不利于防洪,污染了地下水。不合理的引水灌溉,可能造成灌区次生盐碱化,也可能引起河流盐化。流域大量修建蓄水工程,或不合理使用河川径流,或不合理跨流域调水,可能使河川径流不合理地减少,甚至断流,导致下游河道淤积萎缩,防洪能力降低,湿地缩小,河口水环境恶化,生物多样性减少。

第二节 水文学发展的回顾

水文学作为地球物理科学的一个分支，主要研究地球系统中水的存在、分布、运动和循环变化规律，水的物理、化学性质，以及水圈与大气圈、岩石圈和生物圈的相互关系。水文学作为水利学科的重要组成部分，主要研究水资源的形成、时空分布、开发利用和保护，水旱灾害的形成、预测预报、防治，以及水利工程和其他工程建设的规划、设计、施工、管理中的水文水利计算技术。水资源合理开发利用和保护，以及水旱灾害的预测预报和防治，是实施经济社会可持续发展的重要支撑条件。因此，水文学在经济社会可持续发展战略中，占有重要的地位。

如果认为对水文规律的第一次定量研究是水文学的开端，那么 1674 年可作为该学科发展的起点。因为在这一年，法国人佩劳特（Perreault）通过分析曾得出法国塞纳河流域的年径流量为该流域降雨量的 $1/6$ 的结论，这是有记载以来人类对水文规律所作的第一次定量描述。自此以后，水文学大体上经历了以下发展阶段。

在 19 世纪，以牛顿力学为基础和模本的古典科学得到了极大的发展。例如，在物理学领域，以牛顿力学为基础，统了一声学、光学、电磁学和热力学。牛顿力学有效地支配着小到超显微粒子、大到宇宙天体的物理世界。在水科学领域，基于牛顿力学，于 1856 年提出了描写渗流运动规律的达西（Darcy）定律，于 1871 年提出了描写明渠缓变不稳定流运动规律的圣维南（St. Venant）方程组。前者为研究土壤水、地下水动力学和地下水资源的形成变化奠定了基础。后者为研究河道和坡面洪水运动，以及流域汇流奠定了基础。这一阶段是水文学的奠基阶段。

20 世纪初至 50 年代，由于生产力的发展，人们期望能科学地了解 and 掌握河流洪水与枯水的变化规律，以便能预测预报洪水与枯水的发生和大小，建造水利工程达到控制洪水、调节枯水的目的。这种与水旱灾害做斗争的客观需要，就导致工程水文学的兴起与发展。1914 年黑曾（Hazen）提出了水文频率计算方法。1921 年罗斯（Ross）提出了面积—时间曲线。1932 年谢尔曼（Sherman）提出了单位线。1935 年霍顿（Horton）在他的著名论文“地表径流现象”中提出了均质包气带的产流理论。1938 年麦卡锡（MaCarthy）提出了马斯京干（Muskingum）洪水演算方法。这些理论和方法的提出，不仅为许多水利工程的建造与运行管理提供了合理的水文计算方法，而且奠定了工程水文学的基本内容。这一阶段确立了水文学的工程水文学的发展方向。

到了 20 世纪 60~70 年代，电子计算机的发明和应用所引发的信息革命，带来了现代科学技术的突飞猛进。经济的迅速发展和人口的快速增长，使得一些国家和地区在 70 年代就出现了水危机。水资源的紧缺已逐步成为经济社会发展的制约因素。加强水资源形成变化规律和水资源合理开发利用及节水技术的研究，成为刻不容缓的研究任务。水资源水文学就在这种背景下兴起并得到发展。差不多在同一时期，人们开始发现，发展就是增长经济的片面观点，必将导致人口膨胀、资源浪费、环境污染。有些国家所走的“先发展经济，后治理污染”的发展道路，已造成了污染治理上愈来愈大的困难。水环境首当其冲，它是最先也是最易被污染的。早在 1962 年美国卡森（Cason）就呼吁要保护生态环境。

因此，如何保护水环境，治理水污染，不仅是各国政府和人民关注的热点，而且摆到了水文学的面前，这就导致了环境水文学的兴起与发展。这一阶段确立了水文学的水资源水文学与环境水文学的发展方向。

近 10 多年来，全球气候变化及大气、海洋、陆地相互作用过程的研究，引起了水文学家广泛的兴趣，并认为波及许多国家和地区的水危机和洪涝灾害，与全球气候变化异常有关。伊格尔森 (Eagleson) 于 1986 年提出了全球尺度水文学 (Global Scale Hydrology) 的概念。太阳辐射在地球上的再分布是气候学研究的中心问题，而水在这种再分布中起着关键性的作用，因为蒸散发、大气中水汽的输送和降水过程都与太阳辐射紧密相关，这就是全球尺度水文学或大尺度水文学研究的基本问题。目前，全球尺度水文学的研究已初见端倪，已在大气相互作用理论的野外试验，以及应用遥感技术探索地表水文过程空间变异性等方面开展了研究，并取得了进展。一些人士认为，全球尺度水文学的研究对当前和今后水文学的发展具有重要意义；水文学家要想成为这一领域的生力军，就必须熟悉辐射物理、地球流体力学、降水过程、微气象学、植物生理学和生态学等。

从上述水文学的简要发展过程可以看出，其研究领域越来越拓宽，与人类的关系越来越密切，在经济社会发展中的地位越来越重要。并且可以看到，该学科在其发展过程中所取得的每一项成就，无不体现了社会的需要和人类对真理的追求，也无不深深打上了所处时代科学技术水平的烙印。

第三节 水文学的主要分支学科

分类的依据不同，水文学的分支学科的数量和名称不完全相同。如按基础理论与应用分，则可分为：水文学原理（或称理论水文学）和应用水文学。如按研究方法分，则可分为：动力学水文学、系统水文学、计算水文学、确定性水文学、水文统计学、随机水文学、地理水文学、实验水文学、同位素水文学、数字水文学等。如按研究对象分，则可分为：河流水文学、湖泊水文学、冰川水文学、河口海岸水文学、地下水文学、水文气象学、水文测验学、水资源学等。如按应用范围分，则可分为：工程水文学、农业水文学、森林水文学、城市水文学、环境水文学、生态水文学等。学科的分类方法与学科的发展水平有关，这里所作的分类仅仅是一些举例。下面对部分主要分支学科作简要介绍。

水文学原理 研究自然界水文循环、水分运动和溶质输移转化机理，及水圈与大气圈、岩石圈和生物圈的相互关系。主要内容包括：不同尺度水文循环机理，土壤水分运动、下渗和蒸散发机理、洪水波运动规律、山坡产流、汇流、产沙机理，水文循环中溶质输转化机理等。

河流水文学 研究河流水文现象基本规律及河流资源利用。河流水文现象主要包括：河流补给、河流洪水与枯水、河流热动态与冰情、河流泥沙和河流水质等。河流的形成与水系发育、河槽形势和河床演变、河流生态系统保护与修复也是河流水文学的重要研究课题。

湖泊水文学 研究湖泊（水库）水文现象基本规律和湖泊资源利用。湖泊水文现象主要包括：湖泊水量和水位的变化、湖水运动、湖水热动态、湖水光学、湖水化学、湖泊沉积、湖泊富营养化和生态系统等。湖泊形态及演变也属于湖泊水文学的研究内容。

冰川水文学 研究地球表面冰川、积雪水文现象基本规律、冰雪水资源利用及融冰雪洪水灾害防治。冰川、积雪水文现象主要包括：冰川的形成与变化、全球气候变化对冰川的影响，冰川积雪融化与河流的补给的关系等。

河口海岸水文学 研究入海河口和海岸带水文现象基本规律、河口和海岸带的利用及灾害防治。河口和海岸带的水文现象主要包括：河口洪水波传播与扩散、潮波传播与变形、近岸海流、增、减水、河口盐淡水混合与盐水楔、河口过滤器效应、泥沙运动和泥沙流等。河口三角洲和滩涂形成演变、河口和滩涂生态系统，也是河口海岸水文学研究的重要内容。

地下水文学 研究地下水水文现象基本规律及地下水资源开发利用。地下水水文现象主要包括：地下水形成和储存条件，地下水运动，地下水水量、水位和水质的动态变化等。地下水开发利用引起的环境和生态问题也是地下水文学研究的重要内容。

水文气象学 研究水文循环的大气过程，气候系统中的水分交换，全球变化与水文循环的关系，旱涝中长期预报和可能最大暴雨等。

水文测验学 研究观测水文要素量值及时空分布的方法、仪器设备、技术标准，以及水文资料的传输、分析、整编、储存、检索和数据库技术等。

水资源学 研究水资源时空分布、供需平衡，以及水量、水能、水质的合理开发、利用、保护、管理的理论与方法。主要包括水资源供需分析、水资源系统分析、水资源经济分析和水资源管理等。

工程水文学 研究水文学原理应用于工程实践的方法，为水利工程或其他有关工程的规划、设计、施工、运行管理提供水文依据。主要包括水文计算、水文预报和水利计算等内容。

随机水文学 研究应用随机过程理论、时间序列分析方法和蒙特-卡洛 (Monte - Carlo) 方法等描述水文要素时空变化的原理与方法。主要包括水文随机模型建立及其在表征水文现象统计特征中的应用等。

农业水文学 研究 SPAC (土壤—植物—大气连续体) 系统中水文现象的基本规律，为农业合理用水、节水和灌溉提供科学依据。SPAC 系统中的水文现象主要包括：降水—地表水—土壤水—地下水的相互转化，溶质在 SPAC 系统中的运移转化等。

森林水文学 研究森林水文效应、保水作用及水土流失的防治。森林的水文效应主要包括：森林对降水的影响、林冠截留、林区蒸散发、林地土壤水动态和下渗过程、森林对径流形成机理的影响等。

城市水文学 研究城市化水文效应，为城市的给排水和防洪工程建设，以及生态环境质量改善提供水文依据。城市化水文效应主要包括：城市“雨岛效应”、“热岛效应”、城市化对径流形成机理的影响等。

环境水文学 研究水环境本底特征、水体自净机理及其与水文要素的关系。还研究水环境影响评价和保护以及生态环境修复技术等。

生态水文学 研究生态格局及生态过程中的水文机理，以植物如何影响水文过程及水文过程如何影响植物生长和分布作为主要研究内容。研究对象涉及到江河生态系统、湖泊生态系统、湿地生态系统、森林和疏林生态系统、干旱区生态系统等。

数字水文学 研究基于由信息时代最具代表性特征的数字化技术所构建的平台, 描述水文现象、探索和揭示水文规律的理论基础和具体方法。

第四节 水文学研究方法的基本特点

学科的发展, 新知识、新规律的发现, 从一定意义上说得益于新的研究方法的应用。如果没有新的科学方法和新的研究手段, 那就很难创造新的科学理论。因此, 从学科发展的正反两面的丰富材料中, 总结、提炼成功的研究方法, 再加以充实提高, 是人们实行知识创新应该修炼的一项内功。从水文学发展过程中, 可以初步总结出水文学研究方法的下列主要特点。

1. 多学科的交叉与渗透

学科的相互交叉与渗透, 既存在于同一门类的相邻学科之间, 也存在于不同门类的相关学科之间。水动力学和热力学的引入, 产生了动力学水文学; 系统论、控制论的引入, 产生了系统水文学, 进一步引入计算机技术又导致了计算水文学和实时水文预报技术; 时间序列分析和蒙特—卡洛方法的引入, 产生了随机水文技术; 河系地貌定律和统计物理学方法的引入, 产生了地貌瞬时单位线理论。虽然, 圣维南方法早在 1871 年就提出来了, 但只有在高速度、大容量计算机出现以后, 才能在实际中得到广泛应用; 谢尔曼单位线自 1932 年以后就被广泛使用了, 但只有在系统理论引入后, 才认识到单位线概念是处理线性系统普遍有效的工具, 也就是说, 凡属线性系统, 不论何种现象, 均可借助于单位线来解决实际问题。于是, 河段单位线、坡地单位线、地下水单位线相继提出来了, 泥沙单位线也提出来了, 完全可以预言, 用于河流水质模拟的浓度单位线也会提出来的。对于熟知的马斯京干法和线性水库概念也是如此, 只有当水力学和系统论引入后, 它们才表现出重要的理论价值。在其他学科不断向本学科渗透的同时, 本学科也随时和其他学科交叉。早期本学科主要根据水利工程的规划、设计、运行管理的需要而发展, 因而很早就出现了工程水文学。20 世纪 70 年代以来产生的森林水文学、农业水文学、环境水文学和城市水文学, 则是本学科与农林科学、环境科学和城市科学交叉的结果。

2. 通过水文实验揭示水文规律

广义的水文实验包括布设水文站网进行观测、实验流域和实验室试验等三种。达西定律的发现离不开达西的沙柱渗流试验。20 世纪 60 年代, 如果不是对大量的不同气候和下垫面条件下的水文观测资料的科学分析与归纳, 赵人俊教授就不可能提出湿润地区以蓄满产流为主, 干旱地区以超渗产流为主的结论。这一重要结论为后来赵人俊教授等研制新安江二水源模型和陕北模型奠定了理论基础。20 世纪 70 年代, 如果不是实验流域的发展, 邓恩 (Dune) 等人就不可能揭示出用霍顿产流理论无法解释的饱和地面径流和壤中水径流的产流机制, 这一发展后来成为新安江二水源模型向新安江三水源模型发展的理论依据。1963 年休利尔特 (Hewlett) 等人曾在室内做了一个有趣的试验。将一个 $3\text{ft} \times 3\text{ft} \times 45\text{ft}$ ^① 的倾斜水泥槽, 填满混合得很好的自然沙土, 然后灌水至田间持水量, 加盖塑膜,

① $1\text{ft} = 0.3048\text{m}$, 下同。

以防止蒸发, 结果在 150 天内可明显地观测到流量从填土的槽中排出。这证明了非饱和地下水径流和壤中水径流形成机制的存在。1992 年顾慰祖在滁州水文实验站利用环境同位素技术对一次洪水过程线的径流成分进行了实验分析, 发现地面径流不一定都源于本次降雨, 而壤中水径流与地下水径流中必有非本次降雨的水量, 因此认为, 降雨与地面径流之间严格的一一对应关系是很难获得的。水文实验的难度一般较大, 首先水文现象发生的介质条件、边界条件和初始条件不易进行比尺模拟; 其次, 由于不同比尺实验结果相互转换关系一般不是线性的, 因此单点实验结果有时较难推广到流域中去。曾经有一些水文学家散布过水文实验得不偿失的论调, 但 1986 年克莱米斯 (Klemes) 发表的观点是值得提及的, 他指出: “水文学家最好不要去追求部分相关、部分噪声、有限元、无限划分等, 而应去研究热力学、地球化学、土壤物理学、植物生理学。”这就暗示着水文实验对揭示水文规律的重要性。

3. 应用流域水文模型探索水文规律

流域水文模型是由描述流域降雨径流形成过程的各函数构成的一种物理结构或概念性结构, 或者说是通过一组耦合函数关系及相应参数来模拟流域降雨径流形成过程的一种结构, 它严格满足流域水量平衡原理。流域水文模型的输入是降雨、蒸散发能力等, 输出是流域出口断面流量过程或流域蓄水过程或流域蒸散发过程等。流域水文模型的出现与计算机的发明及广泛应用分不开。20 世纪 70~80 年代是流域水文模型的蓬勃发展时期。中国自 20 世纪 70 年代开始, 一方面积极引进国外有用的流域水文模型, 另一方面致力于新的流域水文模型的研制。在引进的流域水文模型中, 有代表性的是美国 Sacramento 河流预报中心模型、日本水箱 (TANK) 模型和意大利约束系统 (CLS) 模型等。在中国自行研制的流域水文模型中, 赵人俊教授等研制的新安江模型和陕北模型是杰出的代表。由于这两个模型结构合理, 参数物理意义较强, 使用精度较高, 不仅在中国被广泛应用, 而且受到世界气象组织的推荐, 美国国家天气局也在采用, 还被爱尔兰国立大学 Galway 学院国际水文研究生班作为教材。流域水文模型属于数学模型, 它与前述水文实验中的物理模型相比具有如下明确优点: 一是数学模型的所有条件都可以由原型观测数据直接给出, 不受比尺的限制, 即数学模型无相似律问题; 二是数学模型的边界条件及其他条件既可严格控制, 也可随时按实验需要改变; 三是数学模型通用性强, 只要研制出计算程序和相应的软件, 就可通过改变模型参数和定解条件来解决不同的实际问题; 四是数学模型具有理想的抗干扰性能, 只要条件不变, 重复模拟可以得到相同的结果, 不会因人、因地而异; 五是数学模型的研制费用相对比较便宜, 运行管理费用更加便宜。因此, 流域水文模型是一条又快、又好、又省的模拟自然界径流形成的途径, 既可用于对流域径流形成规律的探求, 又可用于处理实际应用问题。事实上, 一些原来主要借助于物理模型来研究的问题, 如水工水力学问题、工程泥沙问题等, 也开始转向主要使用数学模型来寻求问题的解了。经典水力学与计算机技术的结合, 已在 20 世纪 70 年代产生了计算水力学和计算河流水力学。随着流域水文模型研究深入必将导致水文学与计算机技术的更进一步的结合, 计算水文学也将会以独立的分支学科问世。鉴于现行流域水文模型的局限性, 一种可以考虑降雨和下垫面条件空间分布不均匀的分布式流域水文模型, 已经成为新的研究热点。

4. 确定性与随机性研究方法的结合

水的物质结构既不同于固体，也不同于气体。对于固体，分子与分子、质点与质点之间的相互作用十分强烈，确实是组织严密，有条不紊。因此，其分子或质点的运动规律完全由牛顿力学定律来支配。对于气体，情况正好相反，分子与分子、质点与质点之间的相互作用十分微弱，可看作相互独立。因此，气体分子或质点所表现出的非结构纯随机运动，可用统计力学方法来精确描述。对于液体，分子与分子、质点与质点之间，既非严密有序，也非完全随机，而是一种松散的结构关系，牛顿力学不能精确地描述这种运动，统计力学也不能精确地描述这种运动。水的物质结构的这种特点，必然要求在探讨其运动规律时，将确定性的研究方法和随机性的研究方法有机地结合起来，相互补充。此外，自然界的水文要素随时间的变化也是既有确定性的一面，又有随机性的一面的。例如径流在一年之内有丰、枯水期的变化，在年与年之间有多水年、少水年的变化，这是径流变化的确定性表现；径流在未来某一时刻将出现什么量值，一般是不能事先确切预知的，这是径流变化随机性的表现，而且预见期越长，这种随机性表现越明显。因此，在探讨水文要素变化规律时，也应当将确定性的研究方法与随机性的研究方法有机地结合起来，相互补充。20世纪80年代以来，地貌瞬时单位线理论的创立，以及水文随机模拟技术的发展，已经显示了这种确定性与随机性研究方法的相结合在探索水文规律中的重要作用。

第二章 水文循环



第一节 水的奇异物理性质

水作为地球上普遍存在和一切生命赖以生存的物质，有着一些奇异的物理性质，了解和认识这些性质，对认识和分析自然界水文循环现象、水文循环机理和水文循环规律等具有重要意义。

水的密度 大部分液体的密度是随温度的升高而减小的，但水的密度在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最大，为 1 kg/L 。水在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的密度为 0.99987 kg/L 。当水的温度从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，水的密度反而随温度的升高而增大（图 2-1）。水的密度异常还表现为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰的密度比 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的液态水的密度减小约 10%，为 0.915 kg/L 。

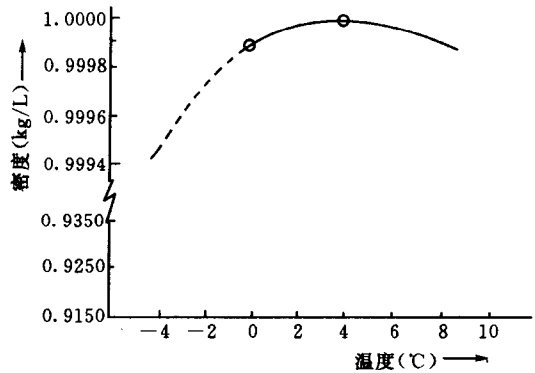


图 2-1 水的密度随温度的变化

水的冰点和沸点 在标准大气压下，纯水的冻结温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，沸点为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与其他氢化物比较几乎都是偏高的（表 2-

1）。水的比热不仅比其他液体和固体为大，而且随温度也呈奇异变化，即在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，水的比热最小，为 $4176.3\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均为 $4186.8\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；水汽的比热在温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和大气压 101325 Pa 时为 $1913.3\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；冰的比热在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为 $2030.6\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，而在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为 $1858.9\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

水的传热性 水的传热性比其他液体小。在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水的传热率为 $0.5987\text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，冰的传热率为 $2.261\text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，雪的传热率更小，当雪的密度等于 0.1 kg/L 时为 $0.093\text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

水的表面张力 水的表面张力特别大。在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，水的表面张力为 $7.549 \times 10^{-2}\text{ N/m}$ ，在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为 $5.715 \times 10^{-2}\text{ N/m}$ ，而其他液体，除水银外，在常温下表面张力都是比

较小的。此外，水对一般固体（石蜡除外）的附着力大于内聚力，故水能够很容易地湿润固体。

表 2-1 水和其他氢化物的冰点和沸点

氢化物名称	分子量	冰点 (°C)	沸点 (°C)	氢化物名称	分子量	冰点 (°C)	沸点 (°C)
甲烷 (CH ₄)	16	-182.8	-161.5	硫化氢 (H ₂ S)	34	-82.9	-59.6
氨 (NH ₃)	17	-77.7	-33.4	硒化氢 (H ₂ Se)	81	-65.7	-41.3
水 (H ₂ O)	18	0.0	100.0	碲化氢 (H ₂ Te)	130	-48.0	-1.8
氟化氢 (HF)	20	-83.0	19.5				

水的压缩率 水的压缩率很小，其体积压缩系数为 $4.7 \times 10^{-5}/1$ 个大气压，因此，水几乎是不可压缩的。

科学家认为，上述水的密度在 0~4 °C 范围内不服从热胀冷缩的一般规律，水的比热比其他物质大、水的表面张力特别大等水的异常物理特性是水分子的异常结构导致的，与其他物质比较，水分子结构的突出点是具有极性和生成氢键的能力，详细分析读者可参阅有关物理化学方面的著作。

第二节 水文循环现象

地球是一个由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈构成的巨大系统。水在这个系统中起着重要的作用，有了水，地球各圈层之间的相互关系就变得十分密切，水文循环则是这种密切关系的具体标志之一。

水文循环现象如图 2-2 所示。自然界的水在太阳能和大气运动的驱动下，不断地从水面（江、河、湖、海等）、陆面（土壤、岩石等）和植物的茎叶面，通过蒸发或散发，以水汽的形式进入大气圈。在适当的条件下，大气圈中的水汽可以凝结成水滴，小水滴合并成为大水滴，当凝结的水滴大到能克服空气阻力时，就在地球引力的作用下，以降水的形式降落到地球表面。到达地球表面的降水，一部分在分子力、毛细力和重力的作用下，通过地面渗入地下；一部分则形成地面径流主要在重力作用下流入江、河、湖泊，再汇入海洋；还有一部分通过蒸发和散发重新逸散到大气圈。渗入地下的那部分水，或者成为土壤水，再经由蒸发和散发逸散到大气圈，或者以地下水形式排入江、河、湖泊，再汇入海洋。水的这种既无明确的“开端”，也无明确的“终了”的永无休止的循环运动过程称为水文循环，又称水分循环或简称水循环。水分由海洋输送到大陆，又回到海洋的循环称为大循环或外循环。水分由陆地输送到陆地，又回到陆地，或由海洋输送到海洋，又回到海洋的循环称为小循环或内循环。一般为区别这两种小循环，将前者叫做内陆小循环，而将后者叫做海洋小循环。

地球系统中存在的水之所以发生水文循环现象，原因之一是水在常温下就能实现液态、气态和固态的“三态”相互转化而不发生化学变化，这是水文循环发生的内因；原因之二是太阳辐射和地心引力为水文循环的发生提供了强大的动力条件，这是水文循环发生的外因。内因是根据，外因是条件，内因通过外因起作用。以上两个原因缺一就不可能形