

960799

TV12
1042

清华大学
水利系
42页:26

高等学校教材



工程水文学

清华大学 王燕生 主编



TV12
1042

060799

版社
28

TV12

1042

高等学 校 教 材

工 程 水 文 学

清华大学 王燕生 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书为高等学校水利水电工程建筑及施工专业的通用教材。全书共分11章，主要内容有：降水与蒸发，土壤水、下渗与地下水，河川径流，水文测验及水文资料搜集，流域产汇流分析，水文预报，水文统计，年径流分析计算，设计洪水，河流泥沙分析等。全书力求理论联系实际，并反映工程水文科学技术的新进展。

本书除供本专业院校师生使用外，也可供从事水利水电工程的科技人员及有关院校师生参考。

高等学校教材

工 程 水 文 学

清华大学 王燕生 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 18印张 409千字 1插页

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数0001—5000册

ISBN 7-120-01611-3/TV·589

定价4.70元

前 言

本教材是水利部“1990~1995年高等学校水利水电类专业本科教材选题和编审出版规划”中，为水利水电工程建筑专业及施工专业编写的通用教材。

本教材采用先阐明水文学原理，再讲述水利水电工程规划设计施工所需要的水文预报及水文分析计算方法的体系，并力图结合工程实际问题，反映工程水文学的新进展。

全书共分十一章。第一章、第二章1~5节、第九章、第十章由王燕生编写；第二章6~8节、第三章、第十一章由毛荣生编写；第四章、第六章、第七章由芮孝芳编写；第五章由潘久根编写；第八章由丁晶编写；全书由王燕生主编。

本教材由袁作新主审。主审对本书进行了非常认真的审查，并给予热心的指导和帮助。本书有些材料引自有关院校和生产科研单位编写的教材及文章，编者在此一并致谢。

最后，我们诚恳地希望读者对本书的缺点和错误提出批评意见，请将意见寄交清华大学水电系王燕生，以便今后改正。

编 者

1991年11月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 工程水文学的研究对象及其在国民经济中的作用	1
第二节 水循环及水量平衡	1
第三节 河流水文现象的基本规律及水文学研究方法	6
第四节 水文学发展史	7
第二章 降水与蒸发	9
第一节 降雨的形成	9
第二节 降雨分类及其特性	9
第三节 降水量观测	14
第四节 降水特性分析	16
第五节 我国降水量概况	20
第六节 蒸散发的物理过程及影响因素	23
第七节 蒸发量的观测及估算	25
第八节 我国蒸发量概况	27
第三章 土壤水、下渗与地下水	29
第一节 土壤水	29
第二节 下渗	34
第三节 地下水	39
第四章 河川径流	46
第一节 流域与河系	46
第二节 河川径流的形成及径流的度量	48
第三节 河川径流的动态变化	52
第五章 水文测验及水文资料搜集	56
第一节 概述	56
第二节 水位观测及资料整理	58
第三节 流量测验	60
第四节 流量资料整编	65
第五节 水文资料搜集	70
第六章 流域产汇流分析	73
第一节 流域产流方式及产流面积变化	73
第二节 超蓄产流的产流量计算	77
第三节 超渗产流的产流量计算	87
第四节 河槽汇流计算	90

第五节	流域汇流计算	99
第六节	流域水文模型	110
第七章	水文预报	118
第一节	概述	118
第二节	短期洪水预报	118
第三节	枯水预报	123
第四节	冰情预报	126
第五节	中长期水文预报	128
第六节	施工水文预报	131
第八章	水文统计	135
第一节	概述	135
第二节	随机变量及其分布参数	135
第三节	水文中常用的概率分布曲线	141
第四节	统计参数估计方法	143
第五节	无偏估计和抽样误差	151
第六节	相关分析	154
第七节	水文时间序列分析	163
第九章	年径流分析计算	168
第一节	概述	168
第二节	影响年径流量的因素	171
第三节	年径流系列的推求	172
第四节	设计年月径流系列	180
第五节	缺乏实测径流资料情况下设计年径流量及年内月分配计算	184
第十章	设计洪水	188
第一节	概述	188
第二节	由流量资料推求设计洪水	192
第三节	由暴雨资料推求设计洪水	222
第四节	可能最大暴雨及可能最大洪水	232
第五节	小流域设计洪水	243
第十一章	河流泥沙分析	254
第一节	概述	254
第二节	泥沙测验	255
第三节	多年平均年输沙量计算	259
第四节	输沙量的年际变化与年内分配	262
第五节	设计洪水过程中的输沙量变化	263
附表		
附表 1	皮尔逊III型频率曲线的离均系数 σ 值表	267
附表 2	皮尔逊III型频率曲线的模比系数 K_p 值表	268
附表 3	瞬时单位线S曲线查用表	273
附表 4	1000hpa地面到指定压力(hpa)间饱和假绝热大气中的可降水量(mm)与1000hpa露点($^{\circ}$ C)函数关系表	279
附表 5	1000hpa地面到指定高度(高出地面数)间饱和假绝热大气中的可降水量(mm)与1000hpa露点($^{\circ}$ C)函数关系表	281

第一章 绪 论

第一节 工程水文学的研究对象及其在国民经济中的作用

水是人类赖以生存的宝贵自然资源。广义水文学是研究地球上江河、湖沼、冰川、地下水及海洋等各种水体的存在数量、分布及变化规律的科学。水文学是与气象学、地理学及生态环境学关系密切的科学。随着科学技术的发展,形成了各种水体分支学科,如:水文气象学、河流水文学、湖泊水文学、沼泽水文学、冰川水文学、地下水文学、海洋水文学、环境水文学等。其中河流水文学与国民经济关系更为密切,促使其发展为内容丰富的一个分支。它包括:水文测验及调查、河流动力学、水文地理、水文实验、水文预报、水文分析计算等内容。工程水文学则是将上述水文科学应用于工程建设,如水利水电能源工程、城市工矿用水、修建铁路、公路、桥梁、国防建设等方面。

工程水文学应用于水利工程中主要研究水利工程的规划、设计、施工和运行管理中有关的水文分析计算和水文预报的基本理论和方法。

水利工程规划设计阶段首先需要预估河流水量及变化,以便确定水利工程的设计规模。例如,为了规划设计水库兴利库容,则需根据河流来水特性与用户特性来决定,若将水库运行期间来水预计过大,则水库规模偏大,导致工程投资积压。反之,来水预计过小,则水库容积偏小,不足以调蓄水量,致使一部分水资源不能利用。洪水的估算对国民经济影响更大,如估算偏大,防洪工程投资过大。反之,防洪工程(如水库防洪库容)调洪能力不足,则不能有效地调洪减灾,将危及人民生命财产的安全。此外,多沙河流的泥沙估算也关系到水库的寿命及效益。

施工阶段需要估算施工期的设计洪水以及确定围堰、导流建筑物的规模,同时需要提供水文预报,科学安排施工进度。

水利工程运行管理期间根据水文预报可以调度水量,提高工程效益,洪水预报更是防汛、蓄洪、减灾必不可少的重要信息。

第二节 水循环及水量平衡

一、地球上水的分布

地球上的水以气态、液态和固态三种形式存在于空中、地面、地下及生物体内,组成一个相互联系的水圈。地球上水的总量为 13.86 亿 km^3 。各种类型水的储量及分布见表1-1。地球水储量中 97.47% 为咸水(主要为含盐量较高的海洋水), 2.53% 为淡水(主要为冰川与冰盖)。可供人类生活、生产用的淡水资源仅占全球水总储量的万分之一,因此水资源是很宝贵的财富,应合理开发利用。

表 1-1

地 球 水 储 量

水 体 种 类	水 量		咸 水		淡 水	
	10 ³ km ³	%	10 ³ km ³	%	10 ³ km ³	%
海洋水	1338000	96.54	1338000	99.04	0	0
地表水	24254.1	1.75	85.4	0.006	24168.7	69.0
其中						
冰川与冰盖	24064.1	1.736	0	0	24064.1	68.7
湖泊水	176.4	0.013	85.4	0.006	91.0	0.26
沼泽水	11.47	0.0008	0	0	11.47	0.033
河流水	2.12	0.0002	0	0	2.12	0.006
地下水	23700	1.71	12870	0.953	10830	30.92
其中						
重力水	23400	1.688	12870	0.953	10530	30.06
地下冰	300	0.022	0	0	300	0.86
土壤水	16.5	0.001	0	0	16.5	0.05
大气水	12.9	0.0009	0	0	12.9	0.04
生物水	1.12	0.0001	0	0	1.12	0.003
全球总储量	1385984.6	100	1350955.4	100	35029.2	100

二、地球上的水分循环

地球上的水，在太阳辐射及地心引力的作用下，不断地运动变化，周而复始，形成一个循环。如果从海洋蒸发作为起点，从广大洋面蒸发的水汽升入高空。其中一部分水汽在适当条件下凝结，形成降水，又落到海洋里；另一部分被气流带到陆地，在一定条件下凝结成降水。降落在陆面的雨雪，一部分则重新蒸发回到高空，一部分经植物截留、地面拦蓄、土壤入渗之后形成地面径流及地下径流，最后又汇归海洋，形成一个闭合的动态系统，称之为水分循环，见图1-1。

从循环的路径可分为大循环及小循环。大循环是指海洋蒸发的水分经输送、凝结、降水、产流、汇流又流至海洋的循环，它是海陆之间水分交换过程。小循环则指海洋的水从蒸发、上升、凝结又回归海洋的局部性循环（海洋蒸发 $50.5 \times 10^4 \text{ km}^3$ 的水汽上升后，其中 $45.8 \times 10^4 \text{ km}^3$ 又凝结降落于海面上，即是小循环）。同理陆地与大气之间的水汽交换，亦属小循环路径。

水循环是一切水文现象的基础，由于存在水分循环，水体才能成为取之不尽用之不竭的再生资源。从表1-1可知全球河流的储水量为 2120 km^3 ，而每年入海的径流总量为 47000 km^3 ，则一年中河川水量需更新再生22次之多，其更新期为0.045年。正是这种水循环作用，才使水资源利用具有很大的优越性。

三、地球上的水量平衡

据地球科学研究成果表明，从地球大气顶层逸出的水量（水分子离解为氢、氧离子状态后逸出），与外空间降落到地球上的物质（陨石等）带来的水量大体相当。因此可以认为地球上的总水量基本不变。在此前提下，根据物质不灭定律，对于任一区域，给定时段

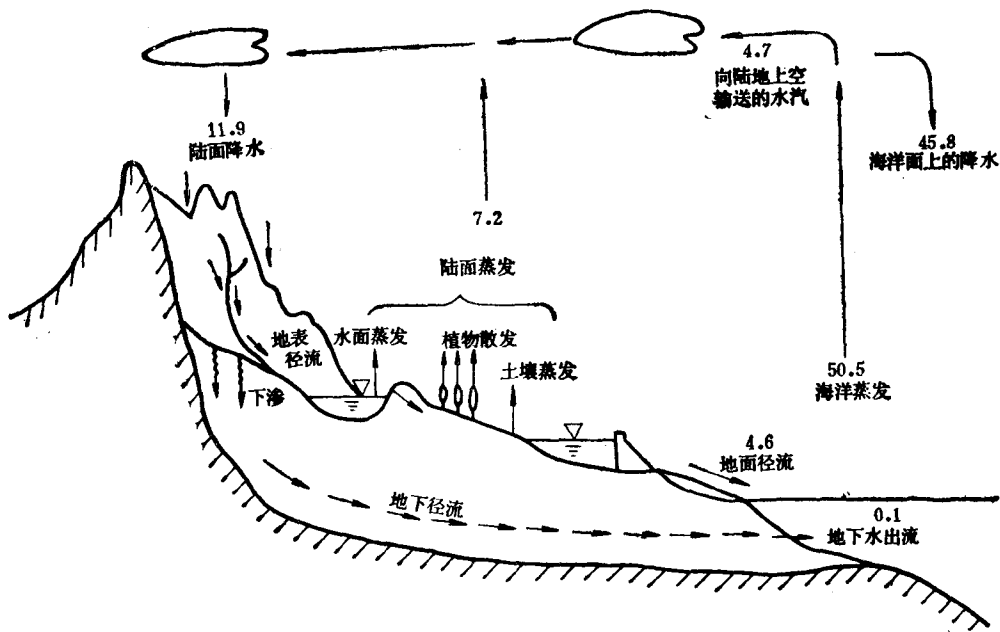


图 1-1 水循环示意图 图中数字单位为 10^4 km^3

内输入的水量与输出的水量之差，必等于区域内蓄水量的变化，这就是水量平衡原理。它是水文学的基本原理，在水文资料分析、水文预报及水文计算中被广泛应用，有助于对水循环概念的进一步理解。

(一) 水量平衡方程

将水量平衡原理用于某一区域，可用如下方程式表达，即

$$I - O = \Delta W \quad (1-1)$$

式中 I —— 在给定时段内输入该区域的总水量；

O —— 在给定时段内输出该区域的总水量；

ΔW —— 时段内区域蓄水量的变化量。

上式为水量平衡方程的通用形式，对不同的研究对象，还需要具体分析其输入输出量的组成，并写出相应的水量平衡方程式。

(二) 河流流域的水量平衡

流域是指河流的集水区域。流域的四周为分水线，分水线由山岭或高地的脊线组成，分水线所包围的区域即是河流的集水区域。地下径流也有地下分水线及集水区域。当地下分水线与地面分水线重合时称为闭合流域。反之，称为不闭合流域。

对不闭合流域其水量平衡方程式如下：

$$P + R_{oi} = E + R_{so} + R_{co} + q + \Delta W \quad (1-2)$$

式中 P —— 流域内给定时段的降雨量；

R_{oi} —— 给定时段内从地下流入的水量；

E ——净蒸发量, $E = E_2 - E_1$, E_2 为给定时段内的蒸发量, E_1 为给定时段内的水汽凝结量;

R_{so} ——给定时段内从地面流出的水量;

R_{co} ——给定时段内从地下流出的水量;

q ——给定时段内工农业及生活净用水量;

ΔW ——时段初及时段末流域蓄水量变化值。

如为闭合流域, 没有其它流域的地下径流进入, 即 $R_{ci} = 0$, 如 q 很小, 亦可取 $q \approx 0$;

令 $R = R_{so} + R_{co}$, 则闭合流域水量平衡方程式如下:

$$P = E + R + \Delta W \quad (1-3)$$

如研究闭合流域多年平均水量平衡, 由于多年中流域蓄水量变化有时为正、有时为负, 其储水量多年平均值趋近于零, 即

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta W) \rightarrow 0$$

式中 n 为年数。因此, 闭合流域的多年平均水量平衡方程式为:

$$\bar{P} = \bar{R} + \bar{E} \quad (1-4)$$

式中 \bar{P} ——多年平均降水量;

\bar{R} ——多年平均径流量;

\bar{E} ——多年平均蒸发量。

对不闭合流域, 如河床下切深度浅的小流域, 其地下径流不完全通过流域出口断面。有一部分从地下渗流到外流域, 岩溶地区溶洞形成地下通道通往外流域, 且其地下径流所占比例较大, 均不能用式(1-4)。需按具体汇流路径范围进行分析。又如对沙漠内流河的流域, 其降水量几乎全部蒸发, $R = 0$ 。

计算时段的大小, 对水量平衡计算有影响。对于短时段, 如以月计, 月降水量、月径流量、月蒸发量其数值较 ΔW 值相对较小, 此时 ΔW 值对径流影响不能忽视。

有时以径流量、蒸发量对降水量的相对值来反映流域的水文特性。将式(1-4)两边除以 \bar{P} 则得:

$$\frac{\bar{R}}{\bar{P}} + \frac{\bar{E}}{\bar{P}} = 1 \quad (1-5)$$

令

$$\frac{\bar{R}}{\bar{P}} = \alpha,$$

$$\frac{\bar{E}}{\bar{P}} = \beta.$$

式中 α ——多年平均径流系数;

β ——多年平均蒸发系数。

代入式(1-5)得:

$$\alpha_0 + \beta_0 = 1 \quad (1-6)$$

在湿润地区 α_0 可大于0.5, 在半干旱地区 α_0 多在0.3以下, 在干旱地区 α_0 只有百分之几, 而蒸发系数可达0.9以上。因此, α_0 与 β_0 的数值可以反映流域的气候地理特性。

我国主要河流的水量平衡要素列于表1-2。

表 1-2 中国主要河流流域水量平衡

流 域	流域面积 (万km ²)	降水量 (mm)	径流量 (mm)	总蒸发量 (mm)	径流系数 (%)
辽 河	21.9	472.6	64.6	408.0	13.7
松 花 江	55.08	526.8	136.8	390.0	26.0
海 河	26.34	558.7	86.5	472.2	15.5
黄 河	75.2	474.6	87.5	387.1	18.4
淮河(包括沂、沭、泗河)	26.9	883.7	231.0	652.7	26.0
长 江	180.85	1070.5	526.0	544.5	49.1
珠 江	44.2*	1469.3	751.3	718.0	51.1
雅鲁藏布江	24.05*	949.4	687.8	261.6	72.4

* 中国境内流域面积。

(三) 全球水量平衡

如以陆地作为研究水量平衡的对象, 某时段的水量平衡方程式可写为:

$$E_c = P_c - R + \Delta w_c \quad (1-7)$$

再以海洋作为研究水量平衡的对象, 某时段内的水量平衡方程为:

$$E_o = P_o + R + \Delta w_o \quad (1-8)$$

式中 E_c 、 E_o ——分别为陆地和海洋在时段内的蒸发量;

P_c 、 P_o ——分别为陆地和海洋在时段内的降水量;

R ——时段内由陆地流入海洋的径流量;

Δw_c 、 Δw_o ——陆地和海洋在该时段内蓄水量变化值。

在多年情况下, Δw_c 及 Δw_o 均趋近于0, 则式(1-7)及式(1-8)可写为:

$$\bar{E}_c = \bar{P}_c - \bar{R} \quad (1-9)$$

$$\bar{E}_o = \bar{P}_o + \bar{R} \quad (1-10)$$

式中 \bar{E}_c 、 \bar{E}_o ——分别为陆地和海洋上的多年平均蒸发量;

\bar{P}_c 、 \bar{P}_o ——分别为陆地和海洋上的多年平均降水量;

\bar{R} ——陆地流入海洋的多年平均径流量。

将式(1-9)、(1-10)相加, 即

$$\bar{E}_c + \bar{E}_o = \bar{P}_c + \bar{P}_o$$

令 $\bar{P}_c + \bar{P}_o = \bar{P}$; $\bar{E}_c + \bar{E}_o = \bar{E}$, 则

$$\bar{E} = \bar{P} \quad (1-11)$$

式(1-11)即为全球水量平衡方程式。全球 P 与 E 均为1130(mm)。全球水量平衡,见表1-3。

表 1-3 全 球 水 量 平 衡

分 区	面 积 (10^4km^2)	总 量 (10^4km^2)			深 度 (mm)			
		降 水	径 流	蒸 发	降 水	径 流	蒸 发	
世 界 海 洋	36100	458	47	505	1270	130	1400	
世 界 陆 地	14900	119	47	72	800	315	485	
其 中	外 流 区	11900	110	47	63	924	395	529
	内 流 区	3000	9	—	9	300	—	300
全 球	51000	577	—	577	1130	—	1130	

第三节 河流水文现象的基本规律及水文学研究方法

一、河流水文现象的基本规律

水文现象与其他自然现象一样,具有必然性和偶然性。水文学中习惯称必然性为确定性,称偶然性为随机性。

1. 水文现象的确定性规律

当一条河流的流域面积上降落一场暴雨,这条河流就会涨水,出现一次洪水过程。如果暴雨强度大,降雨历时长,笼罩面积大,则会出现较大的洪峰、洪量。反之,则洪水较小。这种因果关系一般是确定性的。再如,河流每年都有明显的汛期(洪水期)与非汛期(枯水期),两者周期性交替;冰雪补给的河流具有以日为周期的水量变化。产生这些现象的基本原因是地球的公转和自转。这也说明了水文现象具有客观的发生原因及其形成条件,服从确定性规律。

2. 水文现象的随机性规律

河流每年汛期内都要出现数场洪水,洪水出现的时间每年是不固定的,洪峰流量的大小各场也不同。每年最大的洪峰流量,各年也有所不同。这反映水文现象具有随机的特点。通过大量的观测资料可以发现,特大特小洪水流量出现机会均少,中等洪水出现机会较多,可以用随机性模型描述,即认为水文现象服从随机性规律。

水文现象往往既受到确定因素的作用,又受到随机因素的作用,是十分复杂的。实际应用中,当某种水文现象确定性因素起主要作用时,则以确定性规律描述能反映此种水文现象的本质。同理,随机性亦然。

二、水文学的研究方法

1. 成因分析法

利用水文现象的确定性规律解决水文问题的方法，称为成因分析法。当某种水文现象与其影响因素之间确定性关系较为明确时，可通过观测资料和实验数据，建立水文现象与影响因素之间的定量关系，从而求出比较确切的成果。在水文预报、降雨径流分析中，广泛应用。

2. 数理统计法

根据水文现象的随机性，以概率理论为基础，运用数理统计方法解决水文问题。工程水文学需要对未来水利工程运行时期（百年以上的时间）的水文现象做出预估，这种情况，难以用确定性方法实现（因影响水文过程的因素众多，每个因素在未来时间内的变化也是很复杂的，无法给出确定性答案），只能依据已有的长期观测资料，探求其统计规律（如水文特征值的概率分布），求得工程规划设计所需要的设计水文特征值。在水文分析计算中，数理统计方法是常用的方法。

3. 地理综合法

某些水文现象及水文特征值具有地区性变化规律，可以用等值线图的方式将水文特征值的地区变化反映出来，或建立地区性的经验公式。水文分析计算中，可用此类等值线图或经验公式推求观测资料短缺地区的水文特征值，此即地理综合方法。

以上三种研究方法，在解决工程水文学问题时，常常同时并用，相辅相成。

第四节 水文学发展史

一、水文学发展简史

早在公元前3000年埃及人即开始观测尼罗河水位。公元前450~350年希腊柏拉图和亚里斯多德（Aristotle）提出水文循环的假说。公元前250年，我国李冰在四川都江堰设立石人测量水位。此后公元100~200年东汉王充在《论衡》一书中对水循环概念作了论述。公元1425年（明仁宗洪熙元年）颁布“测雨器制度”。公元1452年意大利达·芬奇（Leonardo da Vinci）用浮标测流速，并通过观测论证了水循环，一些水文学的基本原理开始形成。公元1600~1900期间几种测流速仪器制造成功，如毕托管（Pitot tube）、瓦尔德曼流速仪（Waldmann flowmeter）等；一些水文学原理被科学家发现，如流传至今的伯努利方程（Bernoulli equation）、谢才流速公式（Chezy Velocity formula）、达西定律（Darcy law）、曼宁公式（Manning formula）等。1900~1950年各国逐渐建立正规的水文站、雨量站，水文学基本理论有很大发展，如1932年谢尔曼（L.K.Sherman）的汇流单位线，1940年霍顿（R.E.Horton）的下渗理论等。同时，统计方法也开始用于水文分析计算。50年代之后随着科学实验及有关学科进入水文领域，特别是计算机在水文领域的应用，使水文学向现代化大大迈进，如水文自动遥测系统、水文数学模型、联机预报系统等。

二、建国以来的水文事业

1949年新中国成立后，随着国民经济的发展，水利事业发展很快，水文工作也迅速发展。

1. 水文站

根据水利水电建设和防洪抗旱的需要，建国以来，已建成水文站3269个（为解放前的10倍）、水位站1258个、雨量站15605个、地下水观测站13817个、水质监测站1990个（据1989年统计资料），基本上掌握了主要江河湖库的水文情势。

2. 水文测验

水文测验设备改进很大，水位、雨量的观测正在向自记化方向发展，已有56%站点采用自记水位计，58%站采用自记雨量计。超声波、同位素、电子、遥感等先进技术已开始在水文测验及水情监测中应用。建国以来，收集、整编了80多万站年的水文资料，刊印2000余册《水文年鉴》。近年来，已开始建立水文资料系统，将先进的通信技术及计算机技术应用于水文资料的收集、传输、整理、存储和检索等工作中。

3. 水文预报

为防汛抗旱的需要，全国已有8617处水情站，建有完整的四级预报系统（中央、流域、省、地区）。水文遥测系统与联机洪水预报系统已开始建立并运行。

4. 水文分析计算

已编制出《水利水电工程水文计算规范》及《水利水电工程设计洪水计算规范》及大量的水文手册及水文图集。全国水资源评价工作已完成，已出版了《中国水资源评价》。水文计算理论与实践方面也做了大量的工作，为水利水电规划、设计、施工、管理提供切实可行的水文计算依据。

习 题

1-1 大气圈中的水分以 13000km^3 计，多年平均全球年降水量为 577000km^3 ，试计算其更新期。

1-2 某河流域面积为 21901km^2 ，多年平均年降水量为 476.1mm ，多年平均年径流深为 66.1mm 。试求多年平均年蒸发总量，并计算其多年平均径流系数及蒸发系数。

第二章 降水与蒸发

降水是指液态或固态的水汽凝结物，从云中下降至地面的现象。雨、雪、霰、雹等都是降水现象。蒸发则是由水变成水汽的过程。

降水和蒸发是水循环中最活跃的因子，又是径流形成的主要因素。本章将分述降水与蒸发的基本内容，为今后径流、洪水分析以及水文预报所必需的基础知识。

第一节 降雨的形成

大气中的水分主要来自海洋、河、湖、水库、潮湿土壤及植物等各种蒸发。水汽进入大气之后，由于它本身的分子扩散和气流的传递而分散于大气之中。首先水汽需要转化为云滴。这种水汽变为水的过程称为凝结。水汽凝结需要同时具备两个条件，即要有吸水性的微粒（凝结核）及使空气达到或超过饱和的状态。使空气达到饱和主要靠空气冷却，特别要有空气上升运动引起的绝热冷却。热力对流及动力抬升使空气在上升过程中因体积膨胀，对外做功导致空气本身冷却。在对流层内平均每上升100m，温度降低 0.65°C 。上升到一定高度后，空气就达到饱和，再上升就会达到过饱和而发生凝结成云滴。由于云内空气继续上升绝热冷却，或云外不断有水汽输入云中，使云内空气的水汽压大于云滴的饱和水汽压，这时云内空气中的水汽就会附在云滴上，使云滴增大至云滴周围不能维持过饱和状态为止。云内的云滴大小不一，大云滴下降速度快，在下降过程中大云滴很快追上小云滴，碰撞后合并为较大的云滴，这种现象称为云滴冲并。云滴在凝结与冲并的作用下增大到足以克服空气阻力和上升气流的顶托，并且在降落至地面的过程中不致被蒸发完，降水就会形成。此时如云内温度为 0°C 以上时，降下来的就是雨；如云内温度低于 0°C ，而云下气层的温度高于 0°C 时，从云中下降的是冰晶、雪花及小冰雹，也可以融化为雨滴降落到地面。如在冰晶和过冷却水滴共存的混合云中，冰晶不断凝华增大，形成雪花。当云下气温低于 0°C 时，降落的全部是雪花；如云下气温高于 0°C 时，则可能出现雨夹雪。

第二节 降雨分类及其特性

由于我国主要降水是以降雨的形态出现，因此本课程将以降雨为讨论对象。通常按空气上升运动的原因分为对流雨、地形雨、锋面雨及气旋雨。

一、对流雨

绝对不稳定的气层受到扰动，或因地面空气受热不均匀，温度升高较多的空气，因膨胀而上升与上层空气形成对流运动。暖湿空气上升后，体积膨胀，造成绝热冷却，使水汽发生凝结而形成积状云。积状云内部气流上升强烈，云中含水量大，因此它所产生的降雨

同暖锋相似的层状云系，但云的分布次序与暖锋相反。降雨区出现在锋后，雨区较暖锋天气为窄，多为稳定性降水。当锋前暖空气不稳定时，地面锋线附近也常出现积雨云及雷阵雨天气。夏季，我国西北及华北、冬季南方的天气多属此类。

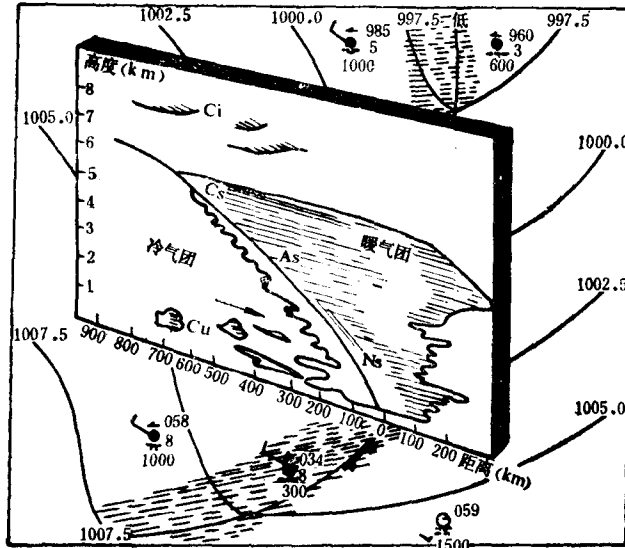


图 2-2 第I型冷锋天气模式

2. 第II型冷锋

第II型冷锋因其移动较快，又称为急行冷锋。见图2-3。因冷气团移动速度快，迫使暖气团产生强烈的上升运动，故锋面坡度大，约为 $1/40 \sim 1/80$ 。夏季暖气团一般湿度大，这种冷锋的地面锋线附近会产生强烈发展的积雨云，其云系呈现沿锋线排列的狭长积状云带。地面锋线附近常出现高层云(A₁)、高积云(A₂)、卷积云(C_u)等。第二型冷锋过境时，往往乌云翻腾，狂风大作，电闪雷鸣，大雨倾盆。其雨强甚大，但降雨历时短，雨区更窄。冬季，当有水汽充足的暖气团时，地面锋线附近也可能出现很厚很低的云层和窄带雨区连续性降水。我国冬半年多出现第二型冷锋。总之，冷锋是影响我国天气的最重要天气系统之一。

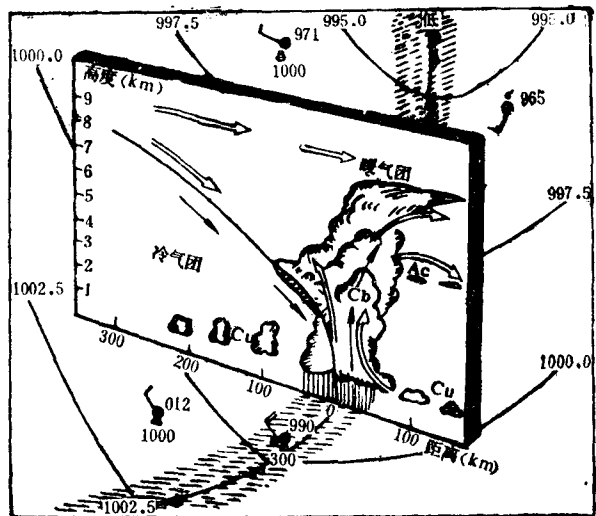


图 2-3 第II型冷锋天气模式

(三) 准静止锋

准静止锋是冷气团与暖气团势均力敌，锋面很少移动时称为准静止锋，见图2-4。准静止锋的坡度比暖锋还小，沿锋面上滑的暖空气可以伸展到距锋线很远的地方，所以云区和雨区比暖锋更为宽广。降雨强度比