



普通高等教育“十二五”规划教材

工程水文学

主 编 王文川

副主编 邱 林 徐冬梅 陈海涛



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

工程水文学

主 编 王文川

副主编 邱 林 徐冬梅 陈海涛



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,是根据当今应用水文学的有关理论和方法,分析河流或其他水体水文要素的变化和分布规律,为工程建设提供水文分析计算技术与方法的专业教材。全书除绪论外共分7章,主要包括:河川径流形成的基本知识,水文信息采集与处理,水文统计,设计年径流及其年内分配,由流量资料推求设计洪水,流域产、汇流分析计算,由暴雨资料推求设计洪水等。

本书为高等学校水利水电工程、工程管理、农业水利工程及水电类专业的教材,也适用于城市给水排水工程、水务工程等专业师生阅读,并可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程水文学 / 王文川主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2013.4

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5170-0761-6

I. ①工… II. ①王… III. ①工程水文学—高等学校—教材 IV. ①TV12

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第071840号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 工程水文学
作 者	主编 王文川 副主编 邱林 徐冬梅 陈海涛
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13.5印张 320千字
版 次	2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	26.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

近年来,我国水利事业得到快速发展,水利建设大规模展开,水利基础设施建设获得迅猛发展。截至2010年,全国江河堤防29.41万km,已建成各类水库87873座,水库总库容7162亿 m^3 ,有效灌溉面积万亩以上的灌区共5795处,农田有效灌溉面积2942万 hm^2 。水利水电工程的大规模建设对设计、施工、运行管理等水利水电专业人才的需求也更为迫切。

2011年7月,中央召开了水利工作会议,对贯彻落实2011年中央1号文件进行了全面部署,在“十二五”期间,要针对水利发展中的突出问题和重点薄弱环节,紧密围绕全面建设小康社会和加快转变经济发展方式要求,把水利作为国家基础设施建设的优先领域,通过深化水利改革、加快水利基础设施建设、加强水资源管理,不断提升水利服务于经济社会发展的综合能力,为促进经济长期平稳较快发展和全面建设小康社会提供坚实的水利保障。

在这种背景下如何更好地培养适应现今水利水电事业发展的优秀人才,成为水利水电专业院校共同面临的课题。为此,华北水利水电学院水文水资源教研室相关任课教师结合多年的课堂教学经验和工作实践,组织编写了工程水文学这门教材。它是水利类专业的一门重要的专业基础课,是为工程规划设计、施工建设及运行管理提供水文计算理论和方法的一门科学,主要包括:河川径流形成的基本知识,水文信息采集与处理,水文统计,设计年径流及其年内分配,由流量资料推求设计洪水,流域产、汇流分析计算,由暴雨资料推求设计洪水等。

本教材由华北水利水电学院王文川担任主编,由邱林、徐冬梅、陈海涛担任副主编。

编者参阅并引用了大量的教材、专著,在此对这些文献的作者们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免出现不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2012年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水文学的研究内容	1
1.2 水文现象的基本规律及水文学的研究方法	2
1.3 工程水文学在水利工程中的作用	3
1.4 水文学的发展	3
习题与思考题	6
第 2 章 河川径流形成的基本知识	7
2.1 水文循环与水量平衡	7
2.2 河流与流域	9
2.3 降水	14
2.4 蒸散发	21
2.5 土壤水、下渗和地下水	25
2.6 径流	28
小结	32
习题与思考题	32
第 3 章 水文信息采集与处理	35
3.1 水文测站与站网布设	35
3.2 水位观测	37
3.3 流量观测	39
3.4 河流泥沙测验与计算	44
3.5 水文调查与水文遥感	47
3.6 水文数据处理	50
习题与思考题	54
第 4 章 水文统计	55
4.1 概述	55
4.2 概率的基本概念	55
4.3 随机变量及其概率分布	58

4.4 常用的概率分布曲线	62
4.5 水文参数估计	66
4.6 水文频率计算适线法	70
4.7 相关分析	77
习题与思考题	85
第5章 设计年径流及其年内分配	87
5.1 年径流变化及其影响因素	87
5.2 具有长期实测径流资料时设计年径流的分析计算	89
5.3 具有短期实测径流资料时设计年径流的分析计算	93
5.4 缺乏实测径流资料时设计年径流量的估算	95
习题与思考题	98
第6章 由流量资料推求设计洪水	100
6.1 概述	100
6.2 设计洪峰流量及设计洪量的推求	104
6.3 设计洪水过程线的推求	117
6.4 入库设计洪水	121
6.5 分期设计洪水	123
6.6 设计洪水的地区组成	124
习题与思考题	124
第7章 流域产、汇流分析计算	126
7.1 流域产汇流计算基本资料的整理与分析	126
7.2 流域产流分析与计算	131
7.3 流域汇流计算	145
习题与思考题	165
第8章 由暴雨资料推求设计洪水	166
8.1 概述	166
8.2 设计面暴雨量的推求	166
8.3 设计暴雨的时空分配计算	172
8.4 由设计暴雨推求设计洪水	174
8.5 小流域设计洪水	178
附录	188
附录1 皮尔逊Ⅲ型频率曲线的离均系数 Φ_p 值表	188
附录2 皮尔逊Ⅲ (P-Ⅲ) 型曲线的模比系数 K_p 值表	191
附录3 三点法用表——S 与 C_s 关系表	197
附录4 三点法用表—— C_s 与有关 Φ 值的关系表	198
附录5 瞬时单位线 S 曲线查用表	200
参考文献	208

第 1 章 绪 论

1.1 水文学的研究内容

1.1.1 水文学

水文学是研究自然界各种水体（大气水、地表水、地下水）的存在、分布、循环、运动等变化规律，物理及化学性质，以及水体对环境的影响和作用的学科。其研究最终目的是利用这些规律为人类服务。

根据研究对象，水文学可分为：水文气象学、陆地水文学、海洋水文学。工程水文学属于陆地水文学范畴，它是将水文学理论应用于水利工程建设的学科，主要为水利工程的规划、设计、施工、管理提供服务。

水文气象学：主要研究降水、蒸发、温度、湿度、风、气压。

陆地水文学：主要研究地表水、地下水，又可分为河流水文学、湖泊水文学、沼泽水文学、冰川水文学、地下水文学、森林水文学等。

海洋水文学：主要研究海温、洋流、风浪、潮汐等。

1.1.2 工程水文学

工程水文学是水文学的一个重要分支，主要研究与水利工程的规划、设计、施工、管理有关的水文问题，为工程规划设计、施工、运行管理提供水文依据。

工程水文学的主要研究内容包括水文计算和水文预报。

（1）水文计算：主要从概率统计的角度测算工程实施中和完成后，很长时期内可能遇到的各种概率的水文现象的大小与过程。例如：预测某水利工程千年一遇的设计洪峰有多大，千年一遇的设计洪水过程？“千年一遇的设计洪峰”即为“特定概率的水文现象的大小”，“千年一遇的设计洪水过程”即为“特定概率的水文现象的过程”，此处的水文现象即为洪水。

水文计算主要为规划设计提供依据。

（2）水文预报：预报指定地点或地区一定时期内（预见期）水文现象的大小及变化过程。例如：预报某河流断面处未来 24h 的水位有多高，预报某次降水所产生的流量过程？主要为现场施工及工程运行管理提供水文依据。

常研究的水文变量包括：设计年径流、年输沙量、设计洪水。为此，应了解水文现象的基本规律以及水文学的研究方法。

1.2 水文现象的基本规律及水文学的研究方法

1.2.1 水文现象的基本规律

水文现象的基本规律包括确定性规律、随机性规律和地区性规律。

1. 确定性规律（成因规律）

确定性规律表示水文现象形成的内在因果关系，确定的成因和条件将对应于确定的结果。

例如：某河流断面，随着降雨径流量的增加，其相应水位有起涨的趋势；根据质量守恒原理，可得：全球的多年平均降水量等于全球的多年平均蒸发量；某流域一次暴雨过程扣除相应的损失过程等于净雨过程；流域上一次暴雨过程所形成的净雨总量等于本次降水所形成的流域出口断面的径流总量。

2. 随机性规律（统计规律）

随机性即偶然性、不确定性。水文现象虽然有确定性规律，但并不是固定不变，如河流每年有汛期、枯水期，但是各不相同。样本容量很大时，随机变量趋向于一个稳定的分布，或相关变量表现为稳定的相关关系。例如：河流某一断面的水位流量关系、某一流域的降雨径流关系，都具有一定的统计规律。

3. 地区性规律

由于气候因素和地理因素具有地区性变化的特性，因此受其影响的水文现象在一定程度上具有地区性分布特点。若气候条件和自然地理条件相似，则同一水文现象在时空上的变化规律具有相似性。例如：我国南方湿润地区，降水量、径流量普遍丰沛，年内各月径流分配相对比较均匀；而北方干旱地区降水量少，径流量较少，年内分配极不均匀。正因为水文现象具有地区性规律，水文工作者常用降水等值线图、径流等值线图来研究其变化特性。

1.2.2 水文学的研究方法

根据水文现象的基本特征，水文学的基本研究方法相应的可分为三类。

1. 成因分析法

成因分析法根据水文变化的成因规律，由其影响因素预测、预报水文情势的方法。如降雨径流预报法、河流洪水演算法等。

2. 数理统计法

数理统计法根据水文现象的随机性规律，把水文现象当作随机变量，用概率论和数理统计的理论解决水文问题。

3. 地理综合法

水文现象主要受气候因素的影响，而气候在地理分布上是有规律的，因此，可以分析综合出某一地区水文现象的地区规律，找出经验公式或画出等值线图，用于解决无资料的流域水文计算。

以上三种方法相辅相成、互为补充。实际的工程水文计算常常是多种方法综合使用，相辅相成，例如由暴雨资料推求设计洪水，就是先由数理统计法求设计暴雨，再按成因分

析法将设计暴雨转化为设计洪水。因此,在实际运用中,应结合工程所在地的地区特点及水文资料特点,遵循“多种方法,综合分析,合理选用”的原则,以便为工程规划设计提供可靠的水文成果。

1.3 工程水文学在水利工程中的作用

天然来水过程与生产、生活各环节的需水过程常常相互矛盾,而修建水利工程就是为了解决这一矛盾的技术措施。每一项水利工程在实施过程中,都可划分为规划设计、施工和运行管理三个阶段,而每个阶段都需要工程水文学的服务。

1. 规划设计阶段

在此阶段水文计算的主要任务是确定工程的规模。规模过大,造成工程投资上的浪费;规模过小,又使水资源不能充分利用,也是一种浪费。如标准过低,还能导致工程失事,造成工程本身和下游人民生命财产的巨大损失。在多沙河流兴建水利工程还需估算蓄水引水工程的泥沙淤积量,以便考虑延长工程寿命的措施。水利工程的使用期限一般为几十年甚至上百年,规划设计时,必须知道控制水体在使用期间的水文情势,提出作为工程设计依据的水文特征数值,如:设计年径流量、设计洪峰、设计洪水过程线等。水文计算就是研究这类问题的学科。

2. 施工阶段

施工阶段水文计算的任务是为确定临时性水工建筑物的规模提供施工期设计洪水。水利工程工期一般较长,往往需要一个季度甚至长达几年,在施工期间必须对施工期水文情势有所了解。对水文情势的了解应包括两个方面:一方面为确定临时性建筑物如围堰、引水隧洞或渠道的工程规模,须预报整个施工期的天然来水情势,而通常的水文和气象预报,往往不能提供如此长期的预报,仍需通过水文计算来解决这个问题;另一方面,为了安排日常工作也必须了解近期更为确切的水情,这需要提供短期(如几天之内)的水文预报。水文预报是为解决这一类问题服务的。

3. 运营管理阶段

运营管理阶段的主要任务在于使建成的工程充分发挥作用。为此需要了解未来一定时期的来水情况,以便编制水量调度方案,合理调度水量,充分发挥工程效益。因此,水文预报工作十分重要。例如:汛前根据洪水预报信息,在洪水来临之前,预先腾出库容拦蓄洪水,使水库安全度汛,下游免遭洪水灾害。到汛期结束时,及时拦蓄尾部洪水,以保证灌溉、发电等兴利用水需求。

1.4 水文学的发展

水文学的发展,是随着社会经济发展和水利工程发展的需要,从萌芽到成熟、由经验到理论逐步发展起来的。今后的发展仍将遵循这一规律更快地向前发展,以满足社会继续发展的需求。水文学的发展,大体可分为以下几个阶段。

1. 萌芽时期 (1400 年以前)

在一些古文明国家和地区,从历代古籍、文献、碑刻古迹和发掘的文物中,可以发现水文科学萌发的一系列史实:古埃及在公元前 3500~300 年因灌溉引水开始观测尼罗河水位,至今还保存有公元前 2200 年所刻水尺的崖壁。中国古代的一些水利工程如都江堰、灵渠等建成后能较长时期地发挥效益,都与运用水文知识有关,尤其是 2000 年前建成的都江堰,至今仍在发挥巨大的效益。中国西汉四年(公元 4 年)张戎最先提出的“以水攻沙”,对当时和后世治理黄河的影响甚大。中国的测雨可追溯到公元前 11 世纪以前的商代,甲骨文中有细雨、大雨和骤雨的分类。宋秦九韶在《数书九章》记有当时全国都有天池盆测雨量及测雪量的方法。北魏酈道元的《水经注》(527 年)记述干支河流达 1252 条之多,比欧洲同类水平的著作约早 1000 年,是一部水文地理巨著。《吕氏春秋》(公元前 239 年)完整地提出了水循环概念“云气西行云云然,冬夏不辍,水泉东流,日夜不休;上不竭,下不满,小为大,重为轻,圜道业”《吕氏春秋》最先提出水文循环,至今尚为世界学术界所称道。

总的说来,这一时期中国的水文知识居于世界领先地位。

2. 奠基时期 (1400~1900 年)

14~16 世纪欧洲文艺复兴和 18~19 世纪工业革命对自然科学的发展有很大影响。此时期水文方面雨量器、蒸发器和流速仪等一系列观测仪器的发明,为水文现象的实地观测、定量研究和科学实验提供了必要的条件。水文循环在观测和实验基础上得到验证,水文现象由概念描述深入到定量表达,为水文科学的建立奠定基础。这一时期,水文学首先在西欧发展,后在北美兴起,并应用于实际。

1424 年中国开始全国统一制作和使用标准测雨器。1610 年意大利 B. 卡斯泰利提出流量测量方法,英国雷恩发明自记雨量计,1790 年法国 R. 沃尔特曼发明了转子式流速仪,1870 年美国 T. G. 埃利斯发明了旋桨式流速仪,1885 年美国 W. G. 普赖斯发明了旋杯式流速仪,为水文定量观测和水文科学提供了有力的工具。

在欧洲,由于实测水文资料积累和许多实验研究,揭示了一系列水文基本规律。在中国,徐霞客经过 28 年的野外考察,他的游记关于岩溶地貌和水文地理的记述,早于国外同类著作近 300 年。18~19 世纪西欧产业革命促进城市、交通和工业发展,大量的水利建设要求解决各种设计中的水力计算问题,使水力学理论得到较大进步,由此又为一些水文规律的理论研究提供了有力的工具。水文学基本理论和方法逐步完善,使水文计算和水文预报水平得到提高,在工程建设和防洪中的效果日益显著,从而形成以水文计算和水文预报为主的新分支学科——应用水文学。总的说来,在这一时期中国水文科学进展则比较缓慢。

3. 应用水文学的兴起 (1900~1950 年)

进入 20 世纪,特别是经过两次世界大战的破坏后,各国都致力于经济恢复和发展,迫切需要解决城市建设、动力开发、交通运输、工农业用水和防洪等水利工程中的一系列水文问题,促进了水文科学的迅速发展。此时期水文站网扩大,实测资料积累丰富,为水文分析研究提供了前所未有的条件,应用水文学取得了许多新进展。美国在这一时期取得的成果较多,处于领先地位。1900 年美国 J. A. 塞登提出了著名的塞登定律,为天然河道

洪水演进提供了理论。1935年美国的 G. T. 麦卡锡提出的马斯京根方法简化了河道的洪水演进计算。为适应工程设计和防洪要求,水文计算和水文预报方面得出了许多新的概念和方法:1914年, A. 黑曾首先用正态概率格纸选配流量频率曲线。1924年 H. A. 福斯特完整地提出了 P-Ⅲ频率曲线的分析方法。W. 韦伯尔提出了经验频率计算公式。这些学者把概率论和数理统计引进了水文学。1932年美国 L. R. K. 谢尔曼提出的单位过程线被誉为水文学进展的里程碑。1937年美国 M. 贝纳德和 R. K. Jr. 林斯雷等提出可能最大降水/洪水方法。这些水文计算方法在实际应用中得到迅速推广,丰富了应用水文学。1936年美国的 W. G. 霍伊特提出将随机过程引入水文计算,形成了随机水文学。此外,许多应用水文学著作的出版,标志着水文学进入了成熟阶段。

这一时期中国在停滞了数个世纪之后,开始从西方引进了新的水文科学,从事于中国江河水文学的研究。

4. 水文学的现代特色与发展(1950年以后)

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、传递和处理大为方便迅速,节省了大量人力和时间。其次,由于工农业和城市建设的需要,应用水文学发展迅速。第三,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(forecast),还要研究长期的水文趋势预估(predication)。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4颗陆地卫星,取得了许多水文研究成果,并为国际服务。美国、英国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、水系统模型等,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50年代初开始,也提出了具有中国特色的洪水预报方法。

调查、考证和分析历史洪水资料,以弥补实测资料的不足。除广泛调查历史洪水外,90年代又发展古洪水研究,利用放射性同位素碳十四获得全新世(约距今10000年)以来的古洪水资料,在长江三峡、黄河小浪底等水利枢纽工程的洪水计算中取得了丰硕的成果。70年代以来,中国还相继编绘出版了《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和国际水文十年计划(IHD)、世界气象组织(WMO)的业务水文计划(OHP)、联合国教科文组织

国际水文计划 (IHP) 等。广泛的国际合作, 促进了全球水文、水资源知识的交流, 推动了水文科学的发展。

习 题 与 思 考 题

- 1-1 水文现象的基本特征及工程水文学的研究方法是什么?
- 1-2 工程水文学研究的主要内容有哪些?
- 1-3 何为工程水文学? 工程水文学在水利工程中有哪些作用?

第 2 章 河川径流形成的基本知识

2.1 水文循环与水量平衡

2.1.1 自然界的水循环

1. 水循环的概念

地球上的液态和固态水在太阳辐射作用下蒸发而变成水汽，水汽被上升气流带离地面，并在空中飘移，在适当条件下凝结成固态或液态水降落到地面，在重力作用下由高向低流动，直接地或以径流的形式补给地球上的海洋、河流、湖泊、土壤、地下和生态水等，如此永不停止的反复循环，就是水循环的过程。简言之，地球上各种形态的水，在太阳辐射、重力等作用下，通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节，不断地发生相态转换和周而复始运动的过程，称为水循环，如图 2-1-1 所示。形成水循环的外因是太阳辐射和地心引力，太阳辐射分布的不均匀性和海陆的热力性质的差异，造成空气的流动，为水汽的移动创造了条件。地心引力（重力）则促使水从高处向低处流动，从而实现了水分循环。水循环的内因是水存在三态变化。

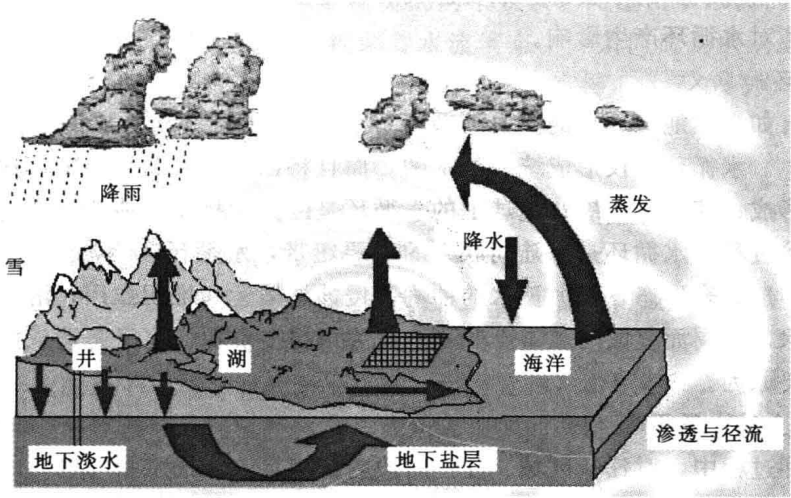


图 2-1-1 水循环示意图

2. 水循环的分类

大循环：从海洋表面蒸发的水汽，被气流输送到大陆上空，冷凝成水后落到陆面，除其中一部分重新蒸发又回到空中外，另一部分则从地面和地下汇入河流重返海洋，这种海陆间水的循环称为大循环。

小循环：又称内部循环，包括海洋小循环和陆地小循环。海洋小循环：海洋表面蒸发

的水汽，若在海洋上空冷凝，直接降落到海洋上；陆地小循环：陆地表面蒸发的水汽，冷凝后又降落到地面。

水循环总的趋势是海洋向陆地输送水汽，陆地向海洋注入径流。海洋向内陆输送水汽的过程中，一部分在陆地上空冷凝降落，形成径流，向海洋流动，也有一部分再蒸发成水汽继续向更远的内陆输送，愈向内陆运动水汽愈少，循环逐渐减弱，直到不能形成降水为止。这种循环情况叫内陆循环。

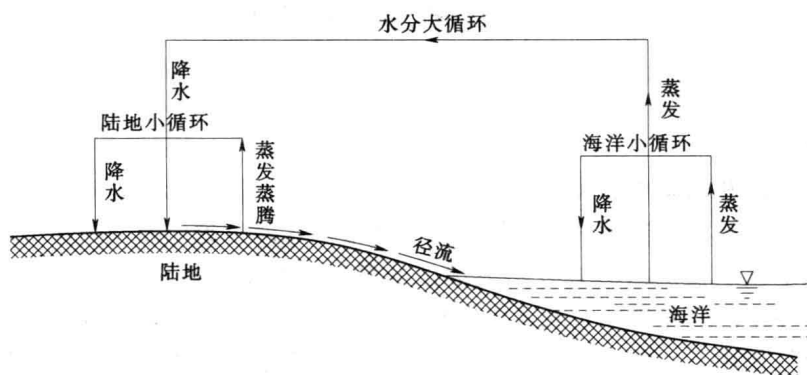


图 2-1-2 水循环剖面示意图

3. 水循环与水资源的关系

水循环是最重要、最活跃的物质循环之一，与人类有密切的关系。水循环使得人类生产和生活获得不可缺少的水资源，水资源具有再生性和不可代替性。人类可以通过农林措施与水利措施对水循环产生影响。

4. 水循环的意义

水循环有如自然地理环境的“血液循环”，它沟通了各基本圈层的物质交换，促使各种联系的发生。水循环不仅形成统一的水圈，而且将四大圈层联系起来，深刻影响着地球表层结构的形成、演化与发展；地球上的水循环是巨大的物质和能量流动，是具有全球意义的能量传输过程；水循环是海陆间联系的主要纽带，水循环实现海陆之间的相互作用；水循环不断塑造地表形态，例如流水的冲刷、侵蚀、搬运和堆积作用，溶蚀作用；由于存在水循环，水才能周而复始的被重新利用，成为可再生资源。水又是造成洪、涝、旱等自然灾害的主要原因。

2.1.2 地球上的水量平衡

在水循环过程中，对任一区域、任一时段内都满足收入的水量与输出的水量差额，等于该地区的蓄水变量，这就是水量平衡原理。依此，可得任一区域、任一时段的水量平衡方程。

全球的大陆，其水量平衡方程为：

$$P_c - R - E_c = \Delta S_c \quad (2-1-1)$$

全球的海洋，其水量平衡方程为：

$$P_o + R - E_o = \Delta S_o \quad (2-1-2)$$

式中 P_c 、 P_o ——大陆和海洋在时段内的降水量，mm；

R ——流入海洋的径流量, mm;

ΔS_c 、 ΔS_o ——大陆和海洋在时段内的蓄水增量, 等于时段末的蓄水量减时段初的蓄水量, mm。

对于全球, 其水量平衡方程为式 (2-1-1)、式 (2-1-2) 相加, 即:

$$P_c + P_o - (E_c + E_o) = \Delta S_c + \Delta S_o \quad (2-1-3)$$

对于多年平均情况, 由于每年的 ΔS_c 、 ΔS_o 有正有负, 多年平均值趋近于零, 故有

$$\overline{P}_c - \overline{R} = \overline{E}_c \quad (2-1-4)$$

$$\overline{P}_o + \overline{R} = \overline{E}_o \quad (2-1-5)$$

$$\overline{P}_c + \overline{P}_o = \overline{E}_c + \overline{E}_o \quad (2-1-6)$$

即全球多年平均的蒸发量等于多年平均的降水量。

2.2 河流与流域

2.2.1 河流

1. 河流及其组成

在重力作用下, 沿着连续延伸的凹地流动的天然水体称为河流。河流流经的谷地为河谷, 河谷底部有水流的部分称为河床或河槽。枯水期水流所占部位为基本河床, 或称主槽; 洪水泛滥及部位为洪水河床, 或称滩地。面向河流下游, 左边的河岸称为左岸, 右边的河岸称为右岸。

流动的水流与容纳水流的河槽是构成河流的两个要素。河槽由于水流的冲刷和淤积, 形态不断地变化, 而一定的河槽形状又控制着水流情态。一条河流是由众多的支流组成的, 一般取河长最长的或水量最大的一条支流作为干流。直接汇入干流的为一级支流, 直接汇入一级支流的为二级支流, 依此类推。

2. 河流的分段

一条河流沿水流方向, 自高向低可分为河源、上游、中游、下游和河口。河源是河流的发源地, 多为泉水、溪涧、冰川、湖泊或沼泽等。

上游: 紧接河源, 多处于深山峡谷中, 坡陡流急, 河谷下切强烈, 常有急滩和瀑布。

中游: 河段坡度渐缓, 河槽变宽, 两岸常有滩地, 河床较稳定。

下游: 是河流的最下段, 一般处于平原区, 河槽宽阔, 淤积明显, 浅滩和河湾较多。

河口: 是河流的终点, 是河流注入海洋或内陆湖泊的地段, 因流速骤减, 泥沙大量淤积, 往往形成三角洲。

注入海洋的河流, 称为外流河, 如长江、黄河等; 流入内陆湖泊或消失于沙漠中的河流, 称为内流河或内陆河, 如新疆的塔里木河和青海的格尔木河等。

3. 河流基本特征

(1) 河长 L 。自河源沿干流河道至河口的长度称为河长, 以 km 计。

(2) 河流横断面。如图 2-2-1 所示, 分单式断面和复式断面; 只有主槽而无滩地的断面称单式断面, 有主槽又有滩地的断面称为复式断面。

(3) 河流纵断面。河流中沿水流方向各断面最大水深点的连线称中泓线, 沿中泓线的

断面称为河流的纵断面。河流纵断面能反映河床的沿程变化。

(4) 河道纵比降 J 。任意河段两端（水面或河底）的高差 Δh 称为落差，单位河长的落差称为河道纵比降，简称比降，用小数或千分数表示。常用的比降有水面比降和河底比降。河流沿程各河段的比降都不相同，一般自河源向河口逐渐减小。水面比降随水位的变化而变化，河底比降则较稳定。比降常用小数或千分数表示。

当河段纵剖面近于直线时，河段平均比降可按式计算：

$$J = (h_1 - h_0) / l = \Delta h / l \quad (2-2-1)$$

式中 J ——河段的纵比降；

h_1 、 h_0 ——河段上、下端河底高程，m；

l ——河段长度，m。

当河段剖面为折线时，如图 2-2-2 所示，其平均河道坡度 J 按下式计算：

$$J = [(h_0 + h_1)l_1 + (h_1 + h_2)l_2 + \cdots + (h_{n-1} + h_n)l_n - 2h_0L] / L^2 \quad (2-2-2)$$

式中 h_0 、 h_1 、 $\cdots$ 、 h_n ——自下游到上游沿程各点的河底高程，m；

l_1 、 l_2 、 $\cdots$ 、 l_n ——相邻两点间的河长，m；

L ——河段全长，m。

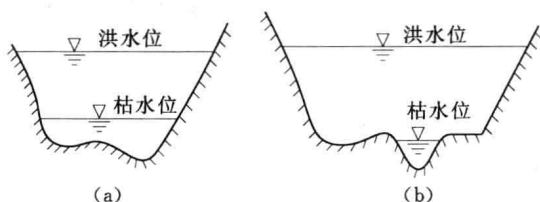


图 2-2-1 河道断面示意图

(a) 单式断面；(b) 复式断面

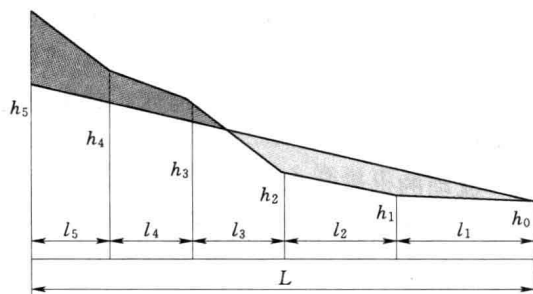


图 2-2-2 河道纵断面示意图

(5) 河网密度。流域内河流干支流总长度与流域面积的比值称为河网密度，以 km/km^2 计。即流域单位面积上的平均河流长度。它表示河网的疏密程度，能综合反映一个地区的汇流能力和自然地理条件。河网分布较密，河网密度大，则汇流能力强；反之则汇流能力弱。

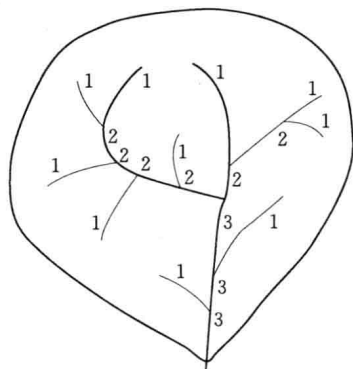


图 2-2-3 流域与水系示意图

4. 河系分级及分类

河系（水系或河网）：河流的干支流及湖泊、沼泽等水体所构成的脉络相通的水流系统叫河系。长度最长或水量最大者作为干流，汇入干流的为一级支流，汇入一级支流的称二级支流，其余类推，此种河流分级方法称为干支流分级法，是较为常用的一种河流分级方法。除此之外，也常采用斯特拉勒河流分级法进行河流分级。该法可表述为：直接发源于河源的小河流为一级河流；两条同级别的河流汇合而成的河流级别比原来高一级；两条不同级别的

河流汇合而成的河流的级别为两条河流中的较高者。以此类推至干流，干流是水系中最高级别的河流，如图 2-2-3 所示。

根据河系干支流分布的状态，河系可以分为如下几种类型：

(1) 树枝状水系。干支流呈树枝状，是水系发育中最普遍的一种类型，一般发育在抗侵蚀力较一致的沉积岩或变质岩地区（图 2-2-4）。如西江上游接纳柳江、郁江、桂江等支流。

(2) 羽状水系。干流两侧支流分布较均匀，近似羽毛状排列的水系（图 2-2-5）。汇流时间长，暴雨过后洪水过程缓慢。如西南纵谷地区，干流粗壮，支流短小且对称分布于两侧，是羽状水系的典型代表。

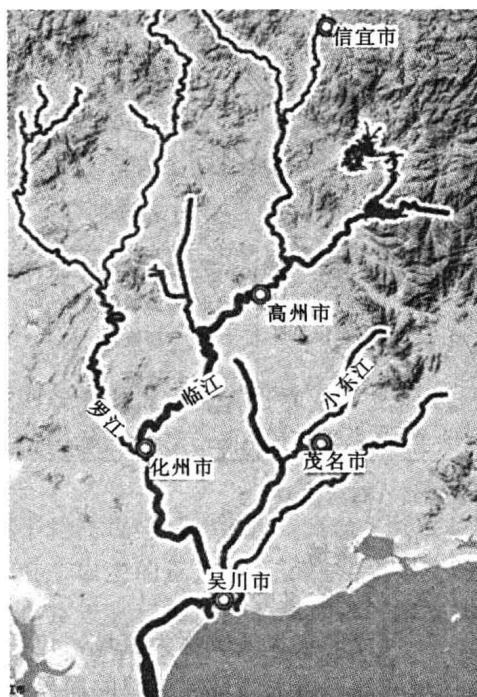


图 2-2-4 树枝状水系

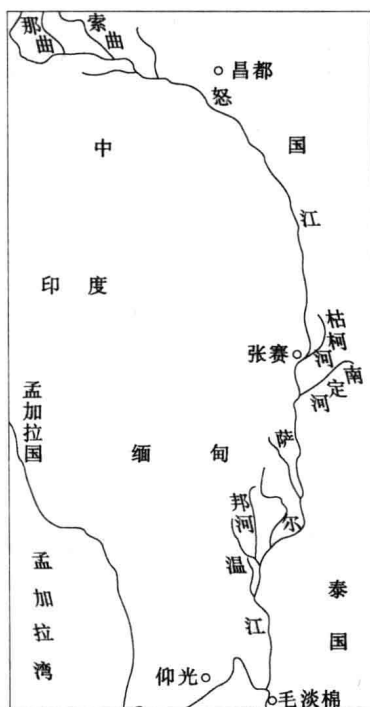


图 2-2-5 萨尔温江—怒江水系
(羽状水系)

(3) 扇形水系。干支流组合而成的流域轮廓形如扇状的水系。如海河水系。北运河、永定河、大清河、子牙河和南运河五大支流交汇于天津附近，之后入海。这种水系汇流时间集中，易造成暴雨成灾，见图 2-2-6。

(4) 平行状水系。支流近似平行排列汇入干流的水系。当暴雨中心由上游向下游移动时，极易发生洪水。如淮河蚌埠以上的水系。

(5) 其他类型水系。格子状水系：由于干支流沿着两组垂直相交的构造线发育而成的，如闽江水系。梳状水系，即支流集中于一侧，另一侧支流少。放射状水系及向心状水系，前者往往分布在火山口四周，后者往往分布在盆地中。通常大河有两种或两种以上水系组成，称为混合水系。