

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

河流动力学

主 编 武汉大学 张小峰
副主编 四川大学 刘兴年
主 审 清华大学 吴保生



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

河流动力学

主 编 武汉大学 张小峰
副主编 四川大学 刘兴年
主 审 清华大学 吴保生



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是水利学科教学指导委员会推荐教材。全书系统介绍了河流动力学的理论,除绪论外共分11章,分别阐述河流泥沙来源、泥沙运动、流域侵蚀、河床演变、河道观测和河床冲淤变形模拟方法等内容。

本书为高等学校水文与水资源工程专业教材,亦可供水利类其他专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

河流动力学 / 张小峰主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.6

高等学校水利学科专业规范核心课程教材. 水文与水资源工程

ISBN 978-7-5084-7638-4

I. ①河… II. ①张… III. ①河流动力学—高等学校—教材 IV. ①TV143

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第120799号

书 名	高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程 河流动力学
作 者	主 编 武汉大学 张小峰 副主编 四川大学 刘兴年 主 审 清华大学 吴保生
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 (营销中心)
经 售	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	175mm×245mm 16开本 13.5印张 312千字
版 次	2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	25.00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



总 前 言

随着我国水利事业与高等教育事业的快速发展以及教育教学改革的不断深入，水利高等教育也得到很大的发展与提高。与1999年相比，水利学科专业的办学点增加了将近一倍，每年的招生人数增加了将近两倍。通过专业目录调整与面向新世纪的教育教学改革，在水利学科专业的适应面有很大拓宽的同时，水利学科专业的建设也面临着新形势与新任务。

在教育部高教司的领导与组织下，从2003年到2005年，各学科教学指导委员会开展了本学科专业发展战略研究与制定专业规范的工作。在水利部人教司的支持下，水利学科教学指导委员会也组织课题组于2005年底完成了相关的研究工作，制定了水文与水资源工程、水利水电工程、港口航道与海岸工程以及农业水利工程四个专业规范。这些专业规范较好地总结与体现了近些年来水利学科专业教育教学改革的成果，并能较好地适用不同地区、不同类型高校举办水利学科专业的共性需求与个性特色。为了便于各水利学科专业点参照专业规范组织教学，经水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划，决定组织编写出版“高等学校水利学科专业规范核心课程教材”。

核心课程是指该课程所包括的专业教育知识单元和知识点，是本专业的每个学生都必须学习、掌握的，或在一组课程中必须选择几门课程学习、掌握的，因而，核心课程教材质量对于保证水利学科各专业的教学质量具有重要的意义。为此，我们不仅提出了坚持“质量第一”的原则，而且还通过专业教学组讨论、提出，专家咨询组审议、遴选，相关院、系认定等步骤，对核心课程教材的选题及主编、主审人选和教材编写大纲进行

了严格把关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好，我们还成立了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会以及各专业教材编审分委员会，对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督，充分依靠各学科专家发挥咨询、评审、决策等作用。

本套教材第一批共规划 52 种，其中水文与水资源工程专业 17 种，水利水电工程专业 17 种，农业水利工程专业 18 种，计划在 2009 年年底之前全部出齐。尽管已有许多人为本套教材作出了许多努力，付出了许多心血，但是，由于专业规范还在修订完善之中，参照专业规范组织教学还需要通过实践不断总结提高，加之，在新形势下如何组织好教材建设还缺乏经验，因此，这套教材一定会有各种不足与缺点，恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材，以利于教、便于学，更希望师生们对此提出建议。

高等学校水利学科教学指导委员会

中国水利水电出版社

2008 年 4 月



前 言



本教材是水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划、组织编写出版的“高等学校水利学科专业规划核心课程教材”之一，为高等学校水文与水资源工程专业的通用教材。

全书共分11章，前6章讲述河流泥沙运动的基本规律，包括河流泥沙的来源和基本特性、泥沙的沉速、泥沙的起动、推移质运动与悬移质运动规律等，第7章阐述流域侵蚀与水土保持方面的知识，第8章和第9章叙述河床演变方面的内容，第10章讲述河道观测和数据库管理系统，第11章讲述河床冲淤变形模拟方法。

本书由张小峰担任主编，刘兴年担任副主编。其中绪论、第1章、第4章、第6章、第11章由武汉大学张小峰编写，第8章、第9章由武汉大学陈立编写，第2章、第3章、第5章、第7章、第10章由四川大学刘兴年、黄尔、王协康编写。编写过程中，引用了有关院校、研究单位编写的教材及技术资料，编者在此一并致谢。

本书由清华大学吴保生教授担任主审，在审稿过程中提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

限于编写者的水平，书中难免有疏漏错误，敬请读者批评指正。

编 者

2010年3月



目 录

总前言

前言

绪论	1
第1章 河流泥沙的来源和基本特性	6
1.1 河流和流域	6
1.2 风化过程与地表物质组成	12
1.3 泥沙的几何特性	15
1.4 泥沙的重力特性	20
参考文献	24
第2章 泥沙的沉速	26
2.1 泥沙沉降的不同形式	26
2.2 泥沙沉速公式	27
2.3 影响泥沙沉速的各种因素	32
参考文献	38
第3章 泥沙的起动	39
3.1 泥沙起动的随机性和起动判别标准	39
3.2 均匀沙的起动条件	41
3.3 非均匀沙的起动条件	51
参考文献	54
第4章 床面形态与水流阻力	55
4.1 沙波形态和发展过程	55
4.2 床面形态的判别	59
4.3 动床阻力	62
参考文献	67

第 5 章 推移质输沙率	69
5.1 均匀沙推移质输沙率公式	70
5.2 非均匀沙推移质输沙率公式	80
5.3 估算推移质输沙率的其他方法	86
参考文献	87
第 6 章 悬移质运动和水流挟沙力	89
6.1 悬移质运动基本方程	89
6.2 含沙量沿垂线分布	93
6.3 水流挟沙力	98
参考文献	105
第 7 章 流域侵蚀与水土保持	106
7.1 土壤侵蚀	106
7.2 流域水力侵蚀产沙预测模型	109
7.3 水力侵蚀区水土保持	115
参考文献	118
第 8 章 河床演变基本原理	119
8.1 平原冲积河流的一般特性	119
8.2 河床演变分类	124
8.3 影响河床演变的主要因素	126
8.4 河流的自动调整作用	127
8.5 河相关系	129
参考文献	134
第 9 章 不同河型平原冲积河流的演变规律	135
9.1 顺直型河段演变规律	135
9.2 蜿蜒型河段演变规律	137
9.3 分汊型河段演变规律	148
9.4 游荡型河段演变规律	153
参考文献	157
第 10 章 河道观测和数据库管理系统	158
10.1 悬移质含沙量和级配测验	158
10.2 推移质与床沙测验	166
10.3 河道地形测量	169
10.4 河道地形和泥沙资料数据库管理系统	172
参考文献	176
第 11 章 河床冲淤变形模拟方法	177
11.1 河床冲淤变形基本方程	177

11.2 一维泥沙数学模型	184
11.3 定床河工模型试验	192
11.4 动床河工模型试验	197
参考文献	205



绪 论

众所周知，河流与人类的关系非常密切，是人类文明的摇篮。河流两岸广阔的冲积平原和源源不断的淡水资源是人类得以生存和发展的重要条件。纵观历史，人类文明基本上都是以河流及流域作为其发源地，例如两河文明发源于底格里斯河与幼发拉底河流域，尼罗河文明发源于尼罗河流域，印度河文明发源于印度河与恒河流域，中华文明则起源于黄河和长江流域。但是河流周期性的洪水泛滥等灾害又对人类生存构成严重的威胁。因此，人类要想趋利避害，谋求社会经济的可持续发展，就需要认识河流。

0.0.1 河流动力学的研究内容

河流是在自然因素及人类影响下水流与河床以泥沙为中介相互作用的产物，有其自身发展变化的客观规律。河动力学就是以力学及统计等方法研究河流在水流、泥沙和河床边界三者共同作用下的变化规律的学科，主要内容包括以下几方面。

(1) 水流结构。研究水流内部运动特征及运动要素的空间分布。河道中的水流运动基本上都属于阻力平方区紊流。水流紊动与泥沙运动密切相关。例如床面泥沙起动和推移质运动等均与床面附近水流的紊动有着密切的联系；河流中的悬移质泥沙之所以在重力作用下依然能够在垂线上保持一定分布，随水流悬浮向前运动，也完全是水流紊动引起上下水团交换的结果。水流结构研究在河动力学中起着重要的支撑作用。

(2) 泥沙运动。研究泥沙冲刷、搬运和堆积的机理。天然河流中，水流与河床是一个矛盾的统一体，一方面水流作用于河床，使河床发生变化，另一方面河床又反过来作用于水流，影响水流结构，二者相互依存、相互影响、相互制约，从而使河流永远处于不断的发展和变化之中。而泥沙运动是水流与河床之间相互作用的纽带。在泥沙运动过程中，泥沙不断从矛盾的一个方面转化到矛盾的另一个方面：一种情况下，泥沙发生沉降淤积，成为河床的组成部分，河床抬高；另一种情况下，河床泥沙遭受冲刷，成为河水的组成部分，河床高程降低。泥沙运动的纽带作用使得关于泥沙运动规律的研究成为河动力学的核心。

(3) 河床演变。研究流域水系的形成和发展、河流系统、河流分类与河型成因、不同类型河流的河床演变规律等。随着河流来水来沙条件的变化,河流将自动调整它的纵向、断面和平面形态以及河床物质组成,以达到与上游来水来沙相适应的河床形态,从而引起河床处于不断的演变过程中。

0.0.2 河流动力学发展过程简述

河流动力学的发展与人类社会的生产发展状态、科学技术水平以及认识手段有着密切的关系。

古代,人类社会的生产力水平低下,科学技术不发达,人类对河流客观规律的认识还处于感性阶段,主要通过对河流治理实践过程中的经验进行积累与总结来完成,还没有河流动力学的概念,对河流动力学的系统认识与论述更无从谈起。那时人类对于河流动力学所形成的一些优秀认识成果散见于一些当时兴修的水利工程以及水利著作中。大约 2200 多年前(公元前 256 年),秦国蜀郡太守李冰修建的都江堰引水工程就巧妙地利用自然河势来分流分沙、引水排沙,是我国古代劳动人民利用河流动力学经验知识治理河道、兴修水利的典范。都江堰水利枢纽位于四川省都江堰市,为岷江

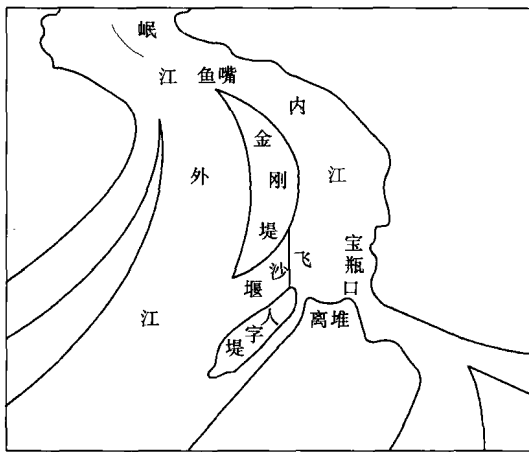


图 0-1 都江堰布局示意图

出山口后进入成都平原的起点,由鱼嘴、金刚堤、飞沙堰、宝瓶口等组成,示意图如图 0-1 所示。鱼嘴位于江心,将岷江分隔成外江和内江,金刚堤是建于江心的分水堤坝,外江排洪,内江引水灌溉。飞沙堰起泄洪、排沙和调节水量的作用。宝瓶口控制进水流流量,因口的形状如瓶颈,故称宝瓶口。宝瓶口附近玉垒山截断的山丘部分,称为离堆。在中小流量时,水流出关口后主流趋左,平顺进入内江。在内江流量小于 $350\text{m}^3/\text{s}$ 时,飞沙堰不溢流,水流过宝瓶口进入引水渠。当岷江流量为 $600\sim 800\text{m}^3/\text{s}$ 时,内江

分流比为 56%。在较大洪水时,河心滩过流,主流趋中,到鱼嘴时偏右,大于 50% 的水流进入外江下泄。河道内大量输移的卵石在上游微弯河势弯道环流的作用下进入外江。飞沙堰位于内江弯道的下段,在弯道环流的作用下进入内江的卵石 90% 以上从飞沙堰排到外江,实测从飞沙堰排出的卵石直径最大可达到 600mm 以上。发生大洪水时,主流直冲离堆的凹形崖壁,反冲后几乎横向宝瓶口,极大地挤压了宝瓶口的有效过水面积,从而控制宝瓶口的进流量。都江堰水利工程建成后,成都平原沃野千里,“水旱从人,不知饥馑,沃野千里,世号陆海,谓之天府”。另外,公元前 246 年,秦王嬴政采用韩国人郑国的建议,兴修了大型灌溉工程郑国渠,西引泾水中的含沙水流灌溉关中原。西汉末年,针对当时黄河河患频发的状况,贾让提出了以“宽河行洪”思想为主的治理黄河三策,对后世产生了重要的影响。

近代以后,随着工业革命的兴起,科学技术飞速发展,河流治理逐渐从过去单纯依靠经验转变为在理论和科学试验指导下进行,对河流的认识越来越系统化、专业化,河流动力学逐渐发展成为一门独立的学科,专门从事河流动力学研究的学者也大量涌现,推动了河流动力学学科的发展。Guglielmini 被西方认为是河流动力学的创始人,他以野外观测的成果为基础出版了河流治理及泥沙运动和沉积的专著。Dubuat (1734—1809) 在他的《水力学原理》第二版中记录了各种尺寸的泥沙颗粒的起动流速,讨论了沙波的形状和运动规律、渠道横断面的稳定、粗化影响、各种均匀流方程以及冲积河流的形态等问题。Baumgarten 在 1848 年出版的书中第一次记述了实测的输沙率,仔细量测了沙波的尺度和运动速度。Dubuit (1804—1866) 是第一个深入研究悬移质输沙的人。Dubois 于 1879 年提出的拖曳力理论被广泛应用于推移质运动的研究。Deacon 在 1894 年通过试验系统观测了沙波运动随水流变化的全过程。Fargue 第一个在室内进行动床河工模型试验研究。Engels 于 1898 年修建了专门的实验室,开展大量有关动床水力学问题的研究。Meyer - Peter 对推移质运动进行了细致的研究,导出了沿用至今的推移质输沙率公式。Rouse 在 1938 年发表的泥沙紊动扩散理论的论文是泥沙运动力学研究的重大成果。Einstein 从理论上系统研究了推移质运动,开创了用流体力学和概率论相结合来研究泥沙运动的先河,并于 1942 年发表了著名的 Einstein 推移质输沙率公式。另外,我国的众多学者也对河流动力学开展了大量的研究工作。张瑞瑾先生主编的《河流动力学》于 1961 年出版,是我国在该领域最早的著作。钱宁先生完成的三部巨著《泥沙运动力学》、《河床演变学》、《高含沙水流运动》奠定了我国泥沙研究在世界上的重要地位。

0.0.3 河流动力学的应用

在河流系统中,泥沙作为一个重要的组成要素,其引发的问题是多种多样的,主要包括以下几方面。

(1) 水库泥沙淤积。我国许多河流含沙量都比较大,水库淤积问题突出。例如 1949 年新中国成立后,我国在黄河上中游和干支流共修建了小(1)型以上水库 700 多座,其中大型水库 25 座,总库容近 900 亿 m^3 。到 20 世纪 90 年代时,大型水库已经淤积的库容近 120 亿 m^3 ,小型水库淤积情况更为严重,淤积量占总库容近 90%,严重影响水库综合效益的发挥。

(2) 水利枢纽下游河床冲刷。在河道上修建水利枢纽后,运行初期,泥沙大量被水库拦蓄,下泄水流含沙量明显降低,下游河床发生冲刷,床沙粗化。河床冲刷类型一般有两种:①枢纽下游较长河段上普遍发生的一般冲刷;②在枢纽下游附近较短河段内发生的局部冲刷。前者的冲刷距离往往长达数十千米到数百千米,后者的冲刷距离虽然只有数十米至数百米,但其冲刷深度较前者大得多。

(3) 引水工程中的泥沙问题。为满足工农业和生活用水,往往需要从天然河道中取水。取水口运行后,在上、下游一定范围内由于分水分沙的影响河势会发生相应的变化,主流线可能发生摆动。因此,在规划设计阶段,必须认真分析取水口所在河段的河床演变、泥沙运动规律及其对取水口的影响。若对这些问题重视不够或处理不好,就会造成取水口和引水渠的严重淤积,甚至使整个取水工程淤废。

(4) 港口航道泥沙问题。港口是水陆联运的枢纽,是货物集散地和转运站;航道

是船舶航行的水上通道,是河道内满足船舶航行尺度要求的连续带状水域。对于港口选址,泥沙淤积问题是重要的考虑因素。航道内若由于泥沙淤积造成船舶搁浅,阻碍航行,则必须采取工程措施予以解决。

(5) 河道泥沙淤积问题。对于多沙河流,河道内泥沙淤积、床面高程抬高是其主要问题。我国的黄河是典型的多沙河流。据 1985 年前统计资料,黄河每年输送到下游的泥沙多达 16 亿 t,其中约有 12 亿 t 输送入海,约 4 亿 t 沉积在河床上,日积月累,河床愈抬愈高,成为举世闻名的“地上悬河”,河床高于两岸地面 3~5m,最大者达到 10m,过洪能力降低,极易酿成洪灾甚至改道,每次洪灾或改道都给两岸人民群众的生命财产造成巨大的损失。近年来,随着沿黄地区社会经济的快速发展,工农业、城乡用水日益增加,人类对河流的干预也不断加大,上、中游水利枢纽日趋增多,进入黄河下游的水量进一步减少,中小流量历时延长。在中小流量下,泥沙淤积主要发生在河槽里,嫩滩附近淤积厚度较大,远离主槽的滩地淤积厚度较小,堤根附近淤积更少,形成“槽高、滩低、堤根洼”的“二级悬河”局面。加上河槽两侧人工生产堤的束缚,“二级悬河”发展十分迅速。目前,只要水流漫滩,大堤堤根附近平均水深就会达到 2~3m,局部河段堤根最大水深可达到 5m 以上,横河、斜河、滚河、堤防发生冲决或溃决等的可能性增大,出现了“小水大灾”的不利局面。这对黄河下游的河势稳定、河道行洪等均产生了非常不利的影响。

上述这些问题的解决主要依靠的就是河流动力学专业知识。

0.0.4 河流动力学的研究方法

泥沙运动涉及的影响因素众多、影响机理复杂,研究方法主要有理论研究、试验研究、原型观测、数学模型等。在研究过程中,这几种方法常常是互相结合补充,相辅相成。

(1) 理论研究。河流动力学的基础理论包括泥沙运动力学基本理论和河流演变过程原理的研究。河流动力学研究对象的物理机理相当复杂,一方面表现出力学作用规律的必然性,另一方面又表现出数理统计意义上的随机性,显示出两面性的特征。力学分析与统计理论是河流动力学研究的主要理论工具。

(2) 试验研究。试验研究是河流动力学研究的一种重要手段,包括水槽试验和河工模型试验。水槽试验主要是为理论研究服务的,也可以检验理论分析成果的正确性。河工模型试验主要是为了解决河流上的工程问题。由于天然河流几何尺度较大,因此一般根据相似原理,将原型河流按一定比尺缩小后再在实验室进行河工模型试验。

(3) 原型观测。原型观测资料是第一手资料,是开展河流动力学研究的一个非常重要的环节。对其进行分析,可以总结出某些基本规律,也可以对理论分析成果进行验证。验证是重要的步骤,如果验证发现问题,就需要进行修正或重新研究,直至验证证实所得结果是可靠的。通过验证可以达到“去粗取精,去伪存真”的效果。

(4) 数学模型。20 世纪 50 年代以来,随着计算机技术的迅猛发展和计算水平的不断提高,人们越来越多地借助数学模型研究河流的问题,特别是大范围、长周期的河流影响和变化,只能采用数学模型的方法进行研究。数学模型正在成为研究河流泥沙问题的一种重要手段。

0.0.5 河流动力学学科展望

从历史角度来说,河流动力学是一门古老的学科,但从发展的角度来说,河流动力学又是一门常新的学科。河流动力学从它建立之日起,就不断地通过与其他学科相互交叉发展,拥有蓬勃的生机与活力。展望河流动力学学科的发展,它应包含两个方面的内容:一是在传统理论与现代化量测技术的基础上,对已有的研究成果进行系统的总结、归纳和提高,对一些假定和近似处理给出更严密的论证,对一些经典的试验成果重新进行检验;二是开拓新的研究领域和研究方向,特别要注重与其他学科和最新的科学技术的交叉与融合。现阶段,随着人类社会经济的向前发展,科学技术的不断进步,河流动力学与其他学科的交叉更趋活跃,主要表现在以下几个方面。

(1) 河流地貌学是研究在水流动力作用下,全流域及其水系的组成物质、形态演变和分布规律的学科,河流动力学通过与地貌学交叉,形成河流动力地貌学。

(2) 河流中泥沙颗粒(特别是细颗粒泥沙)具有很强的吸附能力,在运动过程中可以吸附和携带水体中的污染物质,河流动力学通过与环境学科交叉,形成环境泥沙学。

(3) 如今,地球空间信息科学迅猛发展,河流动力学通过与遥感、遥测和卫星定位系统交叉,建立河流动力学信息系统。

(4) 河流动力学与海岸动力学交叉研究近岸海流、潮汐与波浪作用下的泥沙运动规律及海岸带湿地与生物多样性的保护。

(5) 在流域尺度上,以泥沙为主要研究对象,将流域面与河道作为一个整体加以考虑,实现从河流泥沙向流域泥沙的转变,形成流域泥沙动力学等。

我们相信,在新的世纪里,河流动力学这一学科必将能够迸发出新的活力。

第 1 章

河流泥沙的来源和基本特性

河流是自然界中水流、泥沙输送的主要通道。流域的水土侵蚀是河流泥沙的主要来源。河流中水流与河床的相互作用以泥沙运动为纽带，水流通过泥沙的冲刷、输运和沉积，使河床发生冲淤方面的变化，反过来河床作用于水流，影响水流结构。泥沙运动规律是河流动力学的核心问题。泥沙颗粒在水中的运动既取决于水体的性质和运动状态又与泥沙颗粒的粒径、级配、容重等物理、化学性质有关。认识泥沙颗粒的物理、化学特性是研究泥沙运动规律的基础。

1.1 河流和流域

从水文学的定义来说，在陆地表面上接纳、汇集和输送水流的路径和通道称为河槽，河槽与其中流动的水流，统称为河流。从河流动力学的角度来说，河流是由水、泥沙及河床边界共同组成的系统，三者相互作用、相互制约，并且受外部各种自然因素和人类活动的影响。较大的河流常称为江、川、河，较小的河流常称为涧、溪、沟、曲等。每条河流均有河源和河口，河源是指河流的发源地，河口是河流的终点。水系是指地表水和地下水通过地表和地下途径汇入小沟、溪，然后又汇入较大一级沟、溪或小河，最后逐步汇聚而成江河的河网系统。流域是指河流的集水区，由分水线包围所构成。由于流域内的水流包括地表水和地下水，因此分水线也有地表分水线与地下分水线之分。相应河流集水区可以分为地表集水区和地下集水区两类。如果地表集水区和地下集水区在垂直投影面上相重合，称为闭合流域；如果地表集水区和地下集水区由于地形、地质等方面的原因在垂直投影面上不重合，称为非闭合流域。由于地下水的分水线难以测定，所以平时所称的流域一般指的是地表集水区。

1.1.1 河流系统

从系统论的角度来说，河流系统可以划分为多个子系统，每个子系统又由多个复杂的因子所组成。陆中臣等^[1]将河流系统划分为山坡地系统、河道系统及三角洲系统 3 个子系统。

(1) 山坡地系统：从海洋中蒸发的水汽被气流输送到大陆形成降雨。当降雨落到裸露的坡地上时，开始在坡地上呈面状流动，均匀侵蚀地面，产生泥沙，面状水流逐渐汇集，发展成线状水流，土壤侵蚀能力加强，坡面出现细沟，细沟发育的范围仍属坡地系统。当细沟下部水流进一步集中，发生剧烈侵蚀，形成切沟，切沟的沟底坡度明显不同，沟缘与坡地之间有清晰的转折。切沟沟缘构成坡地系统的下界限，上界为分水岭。其中坡度、地形、物质组成、植被、降雨、温度、重力、地下水等构成了山坡地系统的主要因子。

(2) 河道系统：从切沟开始，水流沟道不断冲深展宽，发育成冲沟和间歇性小溪。水流进一步汇集，不断向低洼处流动，沿程不断冲深展宽，发育成更大的具有常年流水的河槽，水流运动、泥沙输移和沉积成为主要特征，此时属于河道系统。其中流量、流速、水流结构、河槽形态、河道物质组成、河型、含沙量等构成了河道系统的主要因子。

(3) 三角洲系统：河流入海河段，潮汐影响最远的地点是河道系统的下界，也就是三角洲系统的上界。三角洲系统的下界一般认为位于水下三角洲前缘坡度转折点处，也就是整个河流系统的底界。最后，通过河流输运来的水流、泥沙进入海洋。其中径流、潮流、海流、波浪、泥沙等构成了三角洲系统的主要因子。

河流子系统的示意图如图 1-1 所示。从上述过程可以看出，河流系统对全球水文循环、地表泥沙物质输运均起着非常重要的作用。

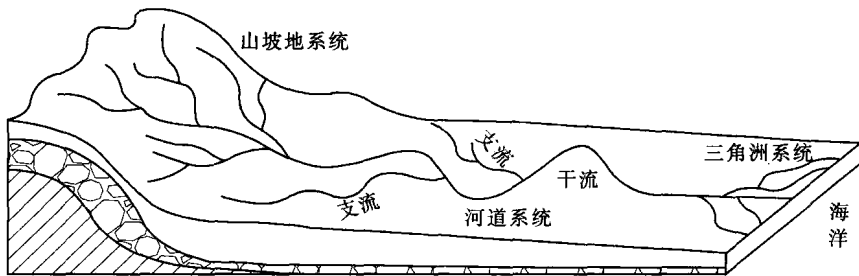


图 1-1 河流子系统示意图

1.1.2 流域几何形态

流域作为河流的集水区，很多特点均与流域面积有关。Hack^[2]发现河流某一控制点以上的干流长度与该点以上的流域面积之间存在如下关系：

$$L = 1.27A^{0.6} \quad (1-1)$$

式中： L 为河流某一控制点以上的干流长度，km； A 为该点以上的流域面积， km^2 。自河源顺流向下，流域面积越来越大。

表示流域整体外形常用的特征指标有：形态要素、流域圆度、流域狭长度和流域对称指标等。

形态要素：

$$R_f = A_u / L_b^2 \quad (1-2)$$

流域圆度：

$$R_c = A_u / A_c \quad (1-3)$$

流域狭长度：

$$R_e = D_c / L_b \quad (1-4)$$

流域对称指标：

$$R_s = A_{u1} / A_{u2} \quad (1-5)$$

式中： A_u 为流域面积； L_b 为流域长度； u 为河段级别； A_c 为与流域具有同一周长的圆面积； D_c 为与流域具有同一面积的圆的直径； A_{u1} 、 A_{u2} 为流域中主流右半侧、左半侧的面积。

1.1.3 水系形态规律

1.1.3.1 水系的平面形态

由于流域内地质、地理条件的复杂多变，水系相应可以形成各种不同的平面形态，它们各自具有不同的特点。

(1) 树枝状。这是一种最常见的水系形态，支流与微弯的干流以锐角相交，多出现在岩石与土层比较单一的地区，形状呈水平状或略有倾斜，在水系初形成时地面坡降较平。

(2) 长方形。由于受直角相交的基岩节理和断裂控制，支流多以直角与干流相交，形成长方形水系，河流与分水岭之间缺乏地区连续性。

(3) 羽毛状。水系由长而接近平行的顺向河和两侧大小几乎相等的小河槽组成。多出现在地形狭长地区，土壤中粉砂含量比较高。

(4) 平行状。一般出现在均匀、和缓并作等坡度下降的坡面上，干流多位于断层或断裂处。

(5) 放射状。受火山口、穹丘、残蚀地形的影响，自高处作辐射状外流的水系。

(6) 环状。在具有结构的穹丘处，可以见到这种水系。从地形特征看与放射状水系相似，但支流受岩石的断裂和节理控制，多呈同心圆状。

此外，水系的平面形态还有格栅状、多棱角状、向心状、分散状等。

图 1-2 为几种类型的水系平面形态示意图。

1.1.3.2 水系组成的 Horton - Strahler 模式

Horton 和 Strahler^[3]认为水系是由不同大小与级别的河道所组成。下面为 Horton - Strahler 水系组成模式中一些形态参数的概念。

(1) 河道级别：水系是由各种大小不同的沟道、河道所组成，河道级别是采用序列方法来表达它们之间差异的分级方法。1945 年 Horton 提出，在一个流域内，最小的不分枝的支流为第一级河道，接纳第一级但不接纳更高级的支流为第二级河道，接纳第一级和第二级支流的河道为第三级河道，依此类推，直到将整个流域中的河道划分完毕为止。按照这种分级方法，主流可以一直延伸到河源，存在一定的不合理性。

1953 年 Strahler 对 Horton 定义方法进行了改进，提出主流向河源延伸的顶端所有最