



计算河流动力学

COMPUTATIONAL RIVER DYNAMICS

黑鹏飞 假冬冬 尚毅梓 编著
周 刚 冶运涛 关见朝



海洋出版社

计算河流动力学

Computational River Dynamics

黑鹏飞 假冬冬 尚毅梓 编著
周 刚 冶运涛 关见朝

海洋出版社

2017年·北京

内 容 简 介

本书系统构建了计算河流动力学基本理论框架。构建原则力求从理论上更严密、准确性更高、更具一般性的模型入手,通过理论推导或经验假设得出一般性可能适度降低但计算效率更高、应用可行性增加的模型。全书共分10章。前4章介绍了水沙两相流运动力学基础理论。第5章至第7章系统介绍河流动力学数学模型的构建,包括含沙水流运动、河床冲淤、河岸崩塌等数学模型构建及理论体系。第8章至第10章分别介绍了一维、二维和三维(包括全三维和准三维)河流动力学模型的具体应用。

本书可作为水利、水电、土木、环境、生态以及其他涉及河流动力的学科教材或参考书。本书有助于广大河流动力和河流生态环境研究人员提高对河流动力的认识,从多相流体力学角度深入理解河流动力过程,并根据具体问题提出具体假设对模型进行简化,进一步实现模型的可行性。

图书在版编目(CIP)数据

计算河流动力学/黑鹏飞等编著. —北京:海洋出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5027-9588-7

I. ①计… II. ①黑… III. ①河流-流体动力学-研究 IV. ①TV143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 248713 号

责任编辑:高朝君

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2017年8月第1版 2017年8月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.5

字数:340千字 定价:48.00元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

河流动力学是研究河道水流运动、泥沙输移和河床演变规律的科学。从远古开始,人类在探索河流运动规律的过程中逐渐积累了大量河流动力学知识和治河经验。物理模型和实验观测方法出现后,泥沙动力、河床演变研究发展迅速,河流动力学理论进一步系统化,逐渐成为一门独立的学科。

20 世纪 60 年代计算机出现后,计算流体力学理论和方法迅速地应用于河流动力研究中。随着河流数学模型应用范围拓展以及计算机快速发展,河流数学模型理论体系的系统性、准确性和应用可行性也不断提高,逐渐形成了一个独立的分支——计算河流动力学。

计算河流动力学是以经典河流动力学、计算流体力学和计算土力学为理论基础,以河流动力数学模型为基本工具,研究河道水沙动力及其与河流边界相互作用规律的科学。

计算河流动力学与经典河流动力学虽然在研究对象方面一致,但在理论基础、方法、研究尺度和精度方面却不尽相同。经典河流动力学的基本特点是从对象的时空平均特征入手,研究对象的概化特征,而计算河流动力学以微观特征入手,研究对象的时空变化;经典河流动力学水沙动力和河床演变计算以经验公式为主,而计算河流动力学基于宏观上无限小的控制体,控制方程建立后采用数值方法求解,因此在研究方法上与计算流体力学和计算土力学相似。但是,计算河流动力学物性参数和边界条件基于河流具体特征给定,用到经典河流动力学内容,因此计算河流动力学是计算流体力学和计算土力学的具体应用。20 世纪 90 年代以后,许多在准确性方面已获得证明的理论,如多相流体力学模型、湍流模型、新的数值算法、边界拟合技术等都迅速应用于河流模拟中。但这绝非简单地应用,即使同一控制方程,在不同边界下计算量常存在量级上的差异,应用可行性差异非常大。计算机运算速度的限制使得许多更具一般性的理论和准确性更高的模型无法直接应用于河流中,每一次应用都需根据河流特性进行新的优化。而计算速度的飞速发展,使得大量理论更完善、准确性更高、尚未得到应用的模型,有希望将来应用于计算河流动力学中。

计算河流动力学的基本特征,使我们必须警觉到,在构建计算河流动力学理论体系时,切不可简单总结或概括当前已获得应用的数学模型和理论,以避免理论同步或滞后于模型应用的问题,使学科产生倦怠。计算河流动力学理论

研究必须重视计算流体力学和计算土力学发展,提高准确性更高的模型在河流动力学中的应用可行性;必须重视经典河流动力学研究方法,一方面提高模型物性参数和动力学参数准确性,更重要的是“三相-两界面”间的经验概化。只要计算流体力学、计算土力学、计算机技术不停滞,计算河流动力学的研究就远不停止,更何况河流动力学本身的神秘面纱还远未揭开,河流动力学在诸多环境问题(如内源污染等)尚未承担应尽责任。迫切需要计算河流动力学在理论方面敞开门户,在应用领域提供更多接口。

本书旨在尝试统观经典河流动力学、计算流体力学、计算土力学整体理论框架,构建计算河流动力学中水沙运动的理论体系,指出目前所用模型及相应理论所处的位置。最后在模型应用部分,给出不同维度数学模型的具体工程应用。但鉴于计算河流动力学内容的复杂性,本书尚属浅薄,需有志之士进一步完善。对于书中疏漏和不当之处,敬请读者不吝赐教。

最后,特别感谢我的博士生导师陈稚聪教授多年教导,同时感谢王兴奎教授、方红卫教授、邵学军教授、韩其为教授和李丹勋教授的精心指导。本书受国家自然科学基金(51209239、51579248)以及水体污染与治理科技重大专项(2017ZX07108-001)资助,一并致谢。

黑鹏飞

2017年7月于北京

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 河流动力研究的重要性	(1)
1.2 计算河流动力学简介	(6)
1.3 计算河流动力学的理论体系框架	(8)
1.4 计算河流动力学的复杂性	(9)
1.5 计算河流动力学的发展制约因素	(11)
1.6 本书内容安排	(11)
第 2 章 河流动力学基础理论	(12)
2.1 含沙水流的基本物理特性	(12)
2.2 含沙水体运动基本特性	(15)
2.3 描述泥沙的基本参数	(18)
2.4 河流泥沙运动基本方式	(25)
2.5 河流泥沙运动基本特性	(26)
2.6 河流分类和相应的水沙过程	(27)
2.7 冲积型河流的河岸变形	(29)
第 3 章 单相流数学模型	(30)
3.1 质点的引入和连续介质假定	(30)
3.2 描述流体运动的两种方式——拉格朗日法和欧拉法	(31)
3.3 牛顿流体运动的数学模型	(33)
3.4 湍流模型	(37)
3.5 单组分浓度输运方程	(43)
3.6 单相流控制方程通式	(44)
3.7 控制方程的曲线坐标转化	(44)
3.8 初始条件和边界条件	(54)
第 4 章 含颗粒固-液两相流数学模型	(56)
4.1 模型分类和选择	(56)
4.2 拟流体模型	(58)
4.3 轨道模型	(69)
第 5 章 河流动力数学模型	(76)
5.1 河流动力数学模型基本特点	(76)
5.2 河流水沙多相流动的控制方程	(76)
5.3 当前悬沙水流运动模型	(77)

5.4	悬移质浓度输运模型	(82)
5.5	推移质数学模型	(85)
5.6	河道纵向演变数学模型	(88)
5.7	非均匀输沙模型	(89)
5.8	河道横向演变模型	(93)
第6章	河流动力数学模型的数值求解	(106)
6.1	数值方法简介	(106)
6.2	水沙控制方程的离散	(110)
6.3	代数方程组求解	(122)
第7章	河流动力数学模型的空间维度简化	(130)
7.1	准三维河流动力数学模型	(130)
7.2	平面二维河流动力数学模型	(133)
7.3	一维河流动力数学模型	(141)
第8章	一维河流数学模型及应用	(150)
8.1	一维水动力模型	(150)
8.2	泥沙要素计算	(159)
8.3	应用实例	(163)
第9章	二维河流数学模型及应用	(167)
9.1	水动力模型构建	(167)
9.2	泥沙数学模型构建	(176)
9.3	边岸崩塌模型构建	(179)
9.4	模型验证和应用	(183)
第10章	三维河流数学模型及应用	(191)
10.1	河流水动力三维数学模型	(191)
10.2	泥沙输移及河床变形方程	(194)
10.3	河道摆动模型验证	(199)
10.4	典型弯道摆动模拟:石首河段	(202)
10.5	准三维模型应用	(208)
参考文献		(217)

第 1 章 绪 论

河流是水沙和河床相互作用的产物，维系这一过程的是河流动力作用，包括水动力、泥沙动力以及水沙和河床相互作用力。河流动力表现形式为水流、泥沙运动以及河床、河岸的冲淤过程。习惯上将泥沙的运动分为悬移质运动和推移质运动，其中悬移质运动是悬浮于水体的泥沙运动，而推移质运动是床面泥沙以滚动、跃移或滑移运动。河床、河岸的冲淤变形除了包括泥沙在静止状态和运动状态间的转化过程，还包括河岸崩塌等过程。

1.1 河流动力研究的重要性

1.1.1 河流动力对人类文明发展的影响

人类和河流的关系可以追溯到古代，最早的人类文明都是沿着河流或河谷发展的，如四大文明古国中尼罗河流域的古埃及文明、黄河流域的古代中国文明以及印度河流域的古印度文明等。

(1) 埃及——“尼罗河的赠品”

埃及处于尼罗河流域的下游，全年降水稀少，气候干燥，尼罗河河谷的两侧都是沙漠，西侧利比亚沙漠，东侧阿拉伯沙漠。尼罗河的动力过程营造了尼罗河河谷。埃及绝大多数人口（现今 95% 的人口）都分布在尼罗河河谷中，而尼罗河 80% 的水源都来自于上游埃塞俄比亚草原的降水，尼罗河从 7 月开始涨水，8 月出现洪水，9、10 月洪水淹没整个河谷，11 月洪水必退。这种洪水动力过程，不仅在这个荒漠中开辟了特殊地貌，而且给河谷覆盖了厚厚的腐殖质，形成了“世界最大的绿洲”。

尼罗河的动力过程也促进了埃及几何学的产生。希腊历史学家希罗多德（Herodotus，约公元前 484 年—公元前 425 年）写到，尼罗河两岸的农田是按面积征税的，当每年河水泛滥破坏了一部分土地后，土地所有者请求相应减少其税额。收税官必须确定损失了多少土地，需要整修和重新丈量土地。这一需求促进了测量法的产生，现代几何学的英文名称“geometry”就是由“geo”和“metry”组成的，意义为“土地测量”。现在发现的埃及纸皮书中，关于数学最重要的是兰德纸草书。这些材料来自埃及王国时代的一份原件（公元前 2000—前 1800 年），主要由一系列的问题及答案组成，其中大约有 20 道题与田地面积和粮仓体积计算有关。

可以说，正是尼罗河的河流动力过程，才创造了古埃及文明，也正因为如此埃及人称“埃及——尼罗河的赠品”。

(2) 黄河文明及其南迁

中国古代文明诞生于黄河流域，常称黄河是中华文明的摇篮。黄河流域曾经因其优越

的自然条件,在唐、宋以前一直是中国古代政治中心,是生产力水平最为发达、人口较为密集的区域。但后来农耕强度的增加和不合理的过度砍伐,“黄河屡次泛滥”导致文明逐渐南迁。

秦汉时期因关中营建都城,大量砍伐附近森林,加重原始森林的破坏,使黄土高原的侵蚀显著加剧,黄河泥沙加大。西汉时期,中游人口迅速增加,乱垦滥伐使黄河泥沙含量增多,下游堤岸增高,“黄河”的称谓已正式出现,黄河开始成为高于平地的“悬河”。王莽始建国三年(公元 11 年),黄河在魏郡(今河南安阳,河北邯郸一带)决口。考古发现的内黄三杨庄水灾遗址,深埋距现今地表 5 m 以下,可见西汉时期黄河泥沙含量之多。黄河中游生态环境的变化,使黄河文明中心东移豫西的洛阳。

东汉至隋朝的 500 多年间,见于记载的黄河河溢仅有 4 次。唐代前期农耕政策开明,西安附近地区的经济迅速发展起来,重新确定了黄河中游的文明中心地位。特别是关中地区作为唐代的政治中心,其经济文化首先得到恢复和发展。为了满足粮食供应,唐代农民在黄河中游地带大量垦殖。从唐朝中期起,黄河泛滥又明显增加。据统计,从“安史之乱”到唐末,黄河在下游决溢 16 次,进入了黄河历史上的第二个泛滥期。

在唐代后期,关中因人口增多粮食不能自给,而开封由于处于水运中枢成为南粮西运的中转站。当时黄河由今河南荥阳市广武向东北方向流去,距开封较远,不过黄河中的船运,由汴河到达开封。汴河自河南荥阳引黄河河水,东南至今江苏盱眙县北入淮河,流经开封,使开封成为水运要塞。北宋时开封周围的水运交通非常发达,惠民河、汴河、五丈河和金水河从城中穿过,史称“四水贯都”。开封因其水运价值而成为北宋国都,因其水生态环境发达而成为黄河文明中心。北宋初期华北平原湖泊众多,曾是千湖之乡。较大的湖泊有河南的荥泽、圃田泽、孟诸泽,河北的大陆泽、鸡泽、黄泽,山东的大野泽、菏泽等。且水运系统发达,黄河蜿蜒于这些湖沼之中,有着广阔的淤沙空间。但中游植被的破坏导致中下游洪水泛滥、湖泊萎缩。泥沙的淤积使荥泽、圃田泽、大陆泽、菏泽等先后消亡,剩余的湖泊也日益萎缩。北宋 160 余年间,黄河决溢达 80 多次,曾三次南流夺淮入海,二次北流天津入渤海,平均两年一次。1048 年发生的黄河商胡改道,是黄河历史上的第三次大改道。此后三四十年间,北宋王朝并未因势利导,曾多次堵塞决口,但屡堵屡决,人为地造成新的洪灾。频繁的河患与决口,严重破坏了黄河下游的水系,使漕运受到严重堵塞。宋天禧三年(1019 年)六月黄河走汴河泛滥,危及京师开封。河水虽未淹没都城,但也淤塞了汴河等四条河流。黄河文明中心地位发生动摇,经济中心也逐渐从黄河中下游地区移向长江中下游区域和广大的江南地区。

历史发展说明,河流动力对于人类文明的发展具有决定性作用。研究河流动力规律对于人类文明具有重要作用。

1.1.2 河流动力相关问题

(1) 河流防洪问题

河流的洪水位不仅与洪水流量有关,而且与河流动力所导致的河势演变有关。

1998 年长江荆江以下最大洪峰流量和最大 60 天洪量对比表明,1998 年洪水总体上小于 1954 年洪水,但 1998 年长江中下游洪水水位大大超过了 1954 年的实测水位,其中一

个重要的因素是河流泥沙的淤积。长江宜昌至城陵矶段(荆江段)和大通河以下的长江口段1957—1986年间泥沙淤积最为严重,荆江每年淤积沙量达1.64亿t,平均每千米淤沙48万t,河床日益增高,汛期洪水水位高出堤内地面10~14m,形成“万里长江,险在荆江”的局面。

黄河下游防洪问题主要产生于泥沙淤积。根据实测资料分析,1950—1998年下游河道共淤积泥沙92亿t,与20世纪50年代相比,河床普遍抬高2~4m。在每年进入下游的16亿t泥沙中,有4亿t淤积在河床中,使河底以平均每年10cm的速率抬高,给防洪带来很大的压力。现行河道滩面高出背河地面4~6m,局部河段高出10m以上。1996年8月,花园口站洪峰流量 $7\,600\text{ m}^3/\text{s}$,但水位比1958年的 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 大洪水还高0.91m。

此外,江堤溃决也是防洪的主要问题,主要包括三种类型:一是突发性窝崩,一次崩岸就直接使防洪堤出现溃口;二是连续多年崩岸,没有及时控制,崩岸直逼堤脚,出现溃口;三是崩岸减小了堤外滩地宽度,在堤内外一定水头下,渗透路径缩短,加速堤基渗漏,易出现管涌险情。

河势变迁增加了堤防建设的难度。防洪的常用手段是加高堤防、控制河势、分流以及加固河岸。在堤防建设中,如不考虑河势变化,则常常发生堤防刚修,主槽易位,发生堤防跟着主槽跑的现象。新中国成立初期不考虑河势的变化规律,哪里吃紧就在哪里修工、抢护。有时工程修好不久,河又走了,只好放弃另修新工。而新工修建不久,河势又发生变化,甚至有时又回到老险工。周而复始,恶性循环。历史上不少险工就是这样形成的。如花园口至中牟河段,保合寨以下堤线长49km,其中险工长度就达41km,占堤线长度的83.6%,但由于险工多系临时应急所成,无系统规划,因此河势依然无法固定。如1964年汛期由于高水量持续时间长,含沙量较低,造床作用强,滩岸坍塌严重,仅从京广铁桥至位山河段就塌滩18万亩^①,坍塌长度两岸总计超过240km,造成河势剧烈变化;而小水时期含沙量却又偏高,致使主槽淤积,加剧主流的摆动。该河段在1964年河势变化十分剧烈,京广铁桥以下,原阳马庄湾坍塌后退1400m,致使花园口老险工几乎全部脱河。据不完全统计,在位山以上河段50余处险工和控导工程中,汛期脱河者达15处,出现6处险工。抢险次数达1400多次,抢险用石近17万 m^3 。历史代价说明,防洪抢险必须清楚河流动力作用规律,预测河势变化趋势,因势利导,统一规划。

(2) 水库泥沙问题

全世界坝高超过15m的水库总库容为 $14\,913\text{ km}^3$ (ICOLD, 1998)。截至2010年年底,我国建成水库87873座,水库总库容7162亿 m^3 。水库具有发电、防洪减灾、改善通航等条件。以三峡水库为例,三峡水库满负荷运行时发电量为4.3亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,每天替代燃烧原煤20万t,减少40万t CO_2 排放。此外,三峡水库可缓解中下游的洪水威胁,可保护下游江汉平原和洞庭湖地区1500万人口的生命财产安全。经过三峡水库的调蓄,能有效控制荆江河段的水位,使其防洪标准由十年一遇提高到百年一遇($83\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 流量),沙市水位不超过44.5m,保证荆江河段和江汉平原防洪安全,可不启用荆江分洪区(如启用,约60万人将需要紧急搬迁)。对千年一遇或1870年洪水,则需配合荆江分洪区运

^① 亩为非法定计量单位,1亩 $\approx 666.7\text{ m}^2$ 。

用，使沙市水位不超过 45.00 m。

水库所产生的泥沙问题主要是库区的泥沙淤积和下游的床岸冲刷问题。但由表 1-1 可以看出，全球年均库容损失约 450 亿 m³，占水库余库容的 0.5%~1%，我国水库年淤损率为世界之最，达 2.3%。表 1-2 统计了部分国内水库淤积情况。泥沙淤积造成水库库容损失，水库淤积会影响水库的发电、航运效益，而且加重洪水发生几率，增加淹没损失。因此必须结合防洪要求，实现水库的合理联合调度、蓄清排洪。

表 1-1 世界水库淤积统计

地区或国家	大型大坝数量（座）	库容（km ³ ）	年淤损率（%）（占剩余库容）
世界	45 571	6 325	0.5~1
欧洲	5 497	1 083	0.17~0.2
北美洲	7 205	1 845	0.2
中、南美洲	1 498	1 039	0.1
中东	895	224	1.5
亚洲（不含中国）	7 230	861	0.3~1.0
中国	22 000	510	2.3

表 1-2 国内部分水库淤积统计

流域	水库	总库容 (×10 ⁴ m ³)	年淤积库容 (×10 ⁴ m ³)	年淤积率 (%)	统计时间
松花江	沟家店	662	9.78	1.48	1963—1990
	马鞍山	108	3.75	3.47	1978—1994
海河	官厅	227 000	1 446.1	0.64	1953—1997
	庙宫	18 300	240	1.31	1960—1999
黄河	三门峡	964 000	17 540	1.82	1960—2000
	青铜峡	60 600	2 002.5	3.30	1967—1996
	巴家嘴	51 100	792.9	1.55	1962—2003
	盐锅峡	23 200	630	2.70	1958—1998
	黑松林	860	20	2.29	1961—1977
	三盛公	9 525	148	1.55	1961—1999
	天桥	8 346	316.4	3.79	1973—1991
长江	丹江口	1 605 000	3 677.3	0.21	1960—2003
	碧口	53 750	1 270.1	3.36	1975—1996
	龚嘴	37 370	867.9	2.32	1971—1998

(3) 河岸冲刷变形问题

河岸冲刷变形在我国河流普遍存在。据统计，1964 年汛期，黄河下游仅从京广铁桥至位山河段就塌滩 18 万亩，坍塌长度两岸共计 240 km 余，原阳马庄湾坍塌后退 1 400 m。

长江中下游崩塌也十分严重,崩岸长度约占长江中下游全部江岸的35.7%,其中,安徽省两岸崩岸长度占总岸线的45%。湖北境内崩岸现象也较为严重,1994年6月,湖北境内长江大堤有近100 km堤段后退400 m,最大后退速率达55 m/h。崩岸现象在水库运行初期尤为严重。水库运行初期,清水下泄,下游河道下切,河岸冲刷加剧,崩岸频繁发生。据统计,黄河三门峡水利枢纽蓄水拦沙期(1960—1964年)花园口至高村河段约有200 km²发生崩塌;三峡工程蓄水以来,水库下游河床冲刷强度加剧,并由蓄水前的“冲槽淤滩”转变为“滩槽均冲”,局部崩岸时有发生,较为典型的是长江南京河段三江口窝崩(图1-1)。此外库区消落带河岸处于干湿交替环境中,也容易产生崩岸。

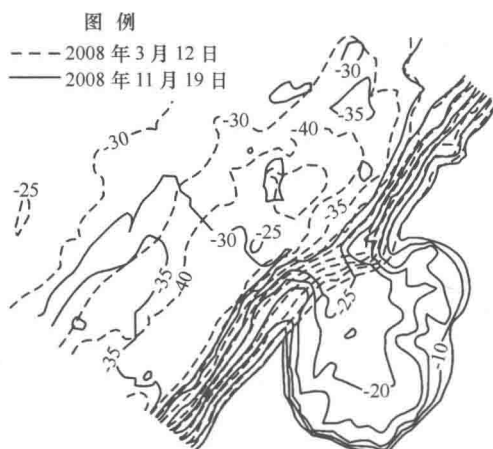


图1-1 三江口窝崩发生前后河道形态

崩岸不仅造成河岸土地丧失和短期堤防威胁,更为严重的是将长期破坏河道稳定,造成治河工程中难以补救的后果。长江下游规模较大的崩岸中窝崩占15%~20%,每次崩塌都会造成巨大的经济损失,例如1996年1月3—8日长江彭泽河段马湖堤突然发生两次大规模窝崩,造成数十人伤亡和近百间房屋倒塌,直接经济损失达4 000多万元(张幸农等, 2007); 2008年11月18日,长江南京河段发生崩岸,形成长约340 m,崩进230 m的崩窝(见图1-2),崩岸面积约 $5.3 \times 10^4 \text{ m}^2$,崩塌土方量约 $110 \times 10^4 \text{ m}^3$,约200 m长的主江堤遭到破坏。

崩岸的机理极其复杂,受河流水沙动力特性及河岸土力学特性的双重影响。正确认识这些影响因素及其对崩岸的作用机理,对研究崩岸发生机理以及制定有效的预测预防措施具有重要意义。

(4) 环境污染问题

泥沙作为化学物质在河流中输运和转化的源和汇,对河流生态系统构成潜在威胁。一方面,泥沙悬浮和解吸会释放营养物质、重金属和其他微量污染物,造成河流污染或水体富营养化。研究表明,即使外源强度消除,内源污染也会导致淡水系统营养元素增加,并将持续数十年(6 years, Kohler et al, 2005; 10 years, Søndergaard et al, 2005; Welch and Cooke, 1999; 20 years, Søndergaard et al, 1999)。内源污染使当前富营养化湖泊在消除外源

污染情况下，研究重点不再是富营养化“是否（whether）”会发生，而是“何时和何程度（when and to what extent）”的问题（Cooke et al, 1993）；另一方面，泥沙吸附或沉降可以降低水体污染物和营养物质浓度，对化学污染来说，可以起到缓冲作用，但对于营养物质而言，浓度过低却可能给河流生态系统造成负面影响。

随着人类对河流水沙调控能力的增强，全球河流水库日渐增多，泥沙对于河流生态环境的影响变得更为突出。水库蓄水期间，库区流速减缓，物质输运能力降低，泥沙淤积加快，污染物浓度升高，经常导致富营养化问题。水库蓄水的另一个问题是导致下游营养物质过低。蓄水期间，虽然水库下游冲刷量增加，但水体含沙量依然会减小，营养物质降低，其中对磷的影响尤为突出。Zhou 等（2015）研究发现，三峡水库运行以来长江下游（鄱阳湖下游）含沙量急剧下降，导致长江中游（宜昌到鄱阳湖）磷降低达 91%，总磷和颗粒态磷年降低 77%和 83.5%，枯季时分别降低 75%和 92%。由此表明，水库运行明显降低泥沙对营养物质的正常调节作用，增加上游发生富营养化的几率，降低下游初级生产力。

河流动力学模型是河流环境污染物流运模型的重要组成部分（图 1-2），对河流环境数学模型的发展具有决定作用。

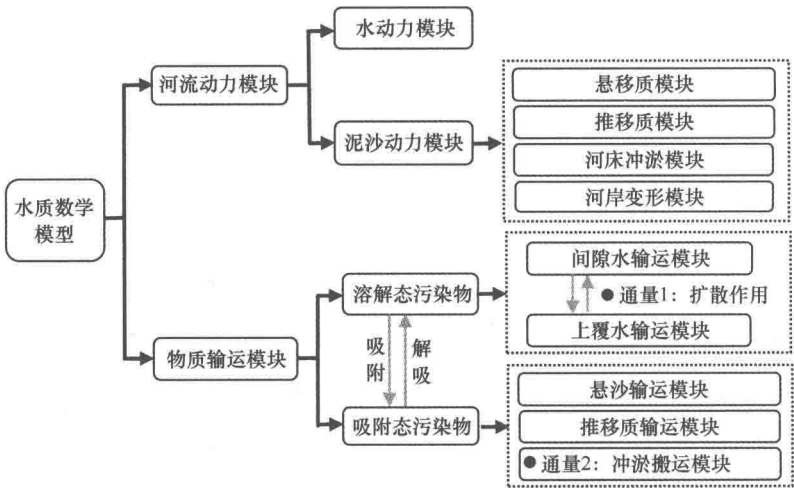


图 1-2 地表水环境模型的基本框架

1.2 计算河流动力学简介

随着计算机和数值算法的发展，河流数学模型在河流动力研究领域获得了迅速发展。早在 1989 年第四次河流泥沙国际学术研讨会上，当时的国际水力学会主席 Kennedy 在书面发言中指出泥沙研究的 10 个重要进展之一就是河流数学模型，并且是 20 世纪 70 年代以后的唯一重要进展。数学模型在河流动力研究领域逐渐成为与理论推理和物理模型同等重要的方法之一。随着河流数学模型应用范围拓展以及计算机快速发展，河流数学模型理论体系的系统性、准确性、严谨性和应用可行性也不断提高，逐渐形成了一个独立完整的分支——计算河流动力学。

1.2.1 概念

计算河流动力学是以河流动力学、计算流体力学和计算土力学为理论基础,以河流动力数学模型为基本工具,研究河道水沙动力及其与河流边界相互作用规律的科学(黑鹏飞等,2016)。

河流是由含沙水体及其边界组成,其中边界为床面(河道底部和河漫滩)和河岸。河流计算中常分为定床和动床,在河床和河岸冲刷不是很大的时候,不考虑河床的变化,仅涉及含沙水流及其两界面的计算;而当河床冲刷较大或属重点研究对象时,还需进行河床和河岸冲淤计算。在河流的计算中还涉及另一重要界面,就是自由表面。因此,计算河流动力学研究对象涉及“三相-两界面”,不同部分各相比比例全然不同,导致材料和力学特性完全不同,研究方法也不同。如河岸土体随着含水率的增加,黏性土颗粒可从固体过渡为半固体,后变为可塑状态,最后可变为液态。即使同为河流含沙水体,随着含沙量的变化也会导致流体特性、甚至本构关系的变化,如水流含沙量增加到一定程度会变为非牛顿流体。河岸土体含水量变化也会对土颗粒间应力状态产生直接影响,进而影响到土体的抗剪强度等宏观力学行为,河流水位变化导致岸坡失稳就是典型的例子。除此之外,不同粒径、级配的土体,其材料性质与动力学特性也有很大差异。计算河流动力学对以上各相的运动、应力和应变的描述用到水、沙、土体的材料变量、状态变量,以及变量与现象间的本构方程,因此计算河流动力学的发展与河流动力学、计算流体力学和计算土力学等学科的基础理论紧密相关。

计算河流动力学与经典河流动力学虽然在研究对象方面一致,但在理论基础、研究方法方面都不尽相同。从20世纪60年代起,计算机和数值算法的快速发展,使得计算流体力学和计算土力学中的模型在河流动力的研究中应用具有了可行性。特别是20世纪90年代以后,许多在准确性方面已获得证明的理论,如多相流体力学模型、湍流模型、新的数值算法、边界拟合技术等都迅速应用于河流模拟中。但这并非简单应用,即使同一控制方程,在不同边界下计算量常存在量级上的差异,应用可行性差异非常大。计算机运算速度的限制使得许多更具一般性、准确性最高的理论无法直接应用于河流中,每一次应用都需根据河流特性进行新的优化。计算速度的飞速发展,使得大量理论更完善、准确性更高、尚未得到应用的模型,也有希望在不远的将来应用于计算河流动力学中。可以说,计算河流动力学是计算流体力学在河流动力学中的具体应用,是传统河流动力学的进一步发展。

1.2.2 研究内容

计算河流动力学主要内容包括三部分:①河流动力作用机理的定量研究;②河流动力过程数学模型的构建和求解;③数学模型具体应用。

理论基础主要包括河流动力基本规律的数学抽象,包括基本物理属性和动力过程的数学抽象,如粒径、级配、沉速、起动流速等;计算河流动力学数学模型构建是基于质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本定理,针对流体质点或泥沙建立质量、动量和能量输运方程,针对天然河流动力和水体运动特性,基于特定假设对于控制方程简化及修正;与计算

流体力学一样,河流动力方程一般无法直接获得解析解,因此必须采用数值方法求解,将微积分控制方程转化为离散节点上的代数方程组,并基于计算机求解;河流模型应用是计算河流动力学的终极目标,通过对河流动力过程的模拟,研究河流动力规律,为工程决策提供依据。

1.2.3 理论基础

经典河流动力学依然是计算河流动力学的基础。除了宏观上介绍水流运动的基本特征和河床演变特征,还介绍了含沙水体性质、泥沙级配、泥沙沉速、泥沙起动、水流挟沙力、非均匀输沙等方面的基础理论。这些内容一方面为河流数学模型框架的构建、方法理论的选择、模型的优化提供依据,另一方面在模型具体构建中为数学模型提供物性参数、应力参数,如泥沙沉速、起动切应力或起动流速等。虽然多基于(空间上)均匀、(时间上)平衡,但工程应用已经证明其一定的合理性。

含沙水流属于含颗粒多相流,计算流体力学中理论基础和数学模型可直接应用于河流动力模拟。包括描述流体运动的基本变量,其中材料变量主要是密度、黏性等,应力变量主要是压力、黏性力等,变形变量主要用到速度应变张量、压力应变等;其次需要吸收计算流体力学关于连续介质输运的基本概念和方法,如质点、连续介质假定、各向同性假定、欧拉(Eulerian)法和拉格朗日(Lagrangian)法,以及控制体及其大小、微观尺度和宏观尺度、多相流的微观尺度、细观尺度及宏观尺度大小的界定,以及应力和应变的本构方程。然而,相对于工业生产中的多相流模拟,河流计算空间范围变化大、泥沙级配宽且作用机理复杂,计算流体力学模型无法直接应用于河流模拟,需要通过模型简化以增加应用的可行性。通常基于河流动力学中水沙特性及边界特征进行简化:首先是含沙多相流模型的简化,其次在空间维度上对模型予以简化。

此外,河岸的横向变形还用到土体剪切应力及抗剪强度、黏性和无黏性土稳定性分析、土体固结等土力学中的相关内容。

1.2.4 研究工具

计算河流动力学的研究手段主要是数学模型。目前数学模型将水流运动、悬移质运动、推移质运动以及河床纵向和横向变形进行分离模拟。悬移质输运模型目前采用近似单相多组分输运方程,只是考虑了泥沙沉速进行修正。推移质运动规律及其复杂性,目前模型常采用质量守恒原理简单建立,相关变量多采用经验公式概化,不同公式间计算结果相差较大。河床垂向变形是根据垂向悬移质和推移质变化总量,基于质量守恒确定。河床横向变形影响因素更为复杂,包括水动力、河岸土体组成和结构。目前横向变形模型仍采用相对简单的经验模型,水动力-河岸变形的交互作用模拟也尚未深入,但随着计算机技术和计算土力学的结合,有望获得突破性的发展。

1.3 计算河流动力学的理论体系框架

由前面内容可知,不同维度水流模型、河床变形和泥沙动力学模型都是一个互相联系

的整体,形成了一个独立完整的理论体系。图1-3以常用经典模型为例,给出具体的理论体系框架。

1.4 计算河流动力学的复杂性

(1) 学科交叉性和综合性

不同物理过程所涉及的主要学科不同。水流运动主要涉及单相流体力学,悬移质运动主要涉及多相流体力学,推移质运动涉及非牛顿多相流体力学,河床演变过程涉及结构力学和土力学。数值模型构建过程中涉及微分方程,数值求解中涉及方程离散、代数方程数值解法。

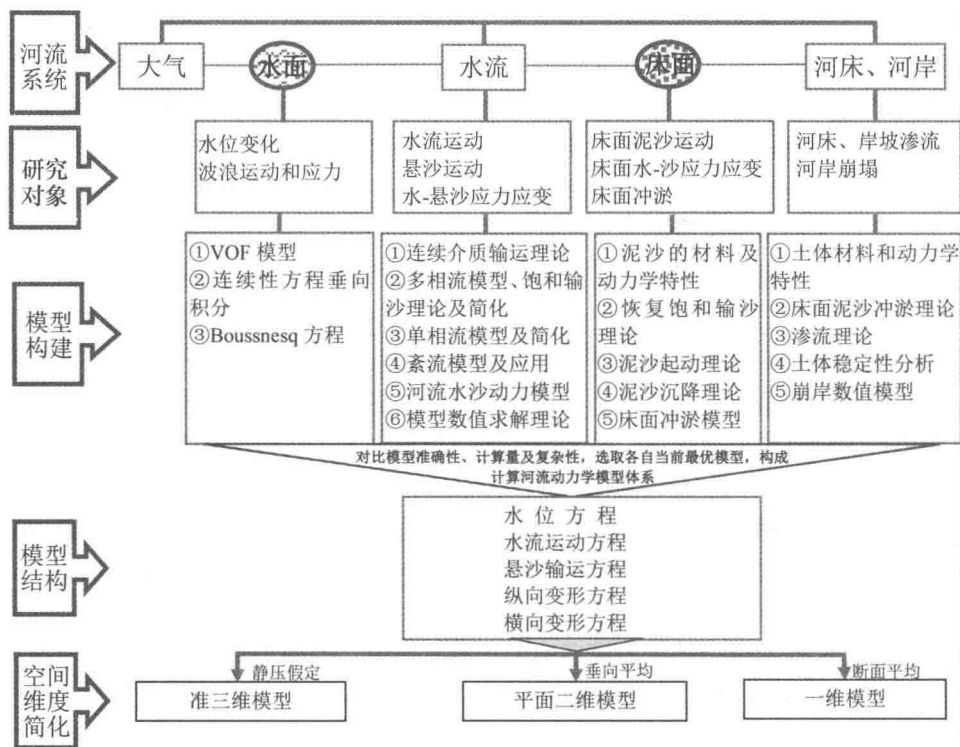


图1-3 计算河流动力学理论框架

(2) 湍流和颗粒物流

湍流及转换是流体力学中一个重要而古老的问题,一直是流体力学中心问题之一,它曾经吸引了不少最著名的力学和物理学家参与研究,但至今仍是流体力学中有待进一步研究的最重要问题之一。1932年诺贝尔物理学奖得主、量子力学创始人之一、著名的“测不准关系”提出者海森堡临终前欲问上帝两个问题,其一是何要有相对论;其二是何有湍流。1992年,在美国工程湍流模拟工作会议上,J. Cole说了一句话:“Solve now, worry later”。20世纪由于计算机和计算方法的发展,曾经有人认为力学问题几乎都可以用计算方法解决。但实际上由于湍流问题没有解决,使得很多问题无法精确计算。虽然直到

现在为止,人们都认为 Navier-Stokes (N-S) 方程可以用以湍流计算,但因计算量太大,因此如果不用湍流概化模型就无法用现有计算机来计算。2005 年《科学》杂志 (Science) 把湍流作为 100 个科学难题之一,与其并列的还有颗粒物质力学等。由于湍流的复杂性,计算河流动力学一直移用计算流体力学成果,尚无针对河流动力具体特征的实质性优化。

(3) 多尺度性

工业过程和自然界的流动现象实际上大多属于复杂流动——多相流、多组分、湍流和非牛顿流普遍存在。在流体的研究中,仅从微观上描述这些结构即使可能也是不经济的,而仅从宏观上描述精度又是不够的。多尺度方法是解决这一难题的实用手段。多尺度方法总体上在 20 世纪 90 年代后才引起广泛关注,目前应用也还相当有限。多尺度方法大致有 3 种类型:描述型,即在模拟过程中对不同时空区域采用不同尺度的描述;关联型,即由小尺度模拟为上一尺度的模拟提供本构关系;变分型,即不同尺度上的模型通过稳定性条件相关联给出系统的总体描述。按上述顺序,它们的侧重点也从数值方法转向系统机理的理论阐述。其中关联型方法的历史相对较长,如大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 和雷诺应力模型在湍流模型封闭中的应用。

(4) 计算机语言实现

数学模型构建实质上是自然规律转换为数学语言的数学抽象过程。计算机语言编译则是数学语言转换为计算机语言的过程。除了不同语言所表述的专业性知识外,语言转换过程本身就具有一定的复杂性。

模型数值求解都依赖于计算机语言。这实际上是对河流动力过程的二次抽象过程,程序代码的编写需要大量工作量,包括程序结构设计、编译、调试工作,往往需要具有数百名专业知识的工作人员协作完成。模型程序语言数量庞大,代码阅读和程序语言编写本身需要大量时间。

不同语言的转化过程,一定程度上制约着计算河流动力学的发展进程。专业融合以及合理分工和协助是解决这一问题的关键。

(5) 质量保证问题

质量保证过程涉及模型选择、模型验证、参数率定、模型边界条件确定、模型求解等每一环节。任一环节出问题,都将影响模型结果的正确性。

其中,模型选择主要是模型空间维数、湍流模型、泥沙运输模型、模型网格类型、模型离散网格的确定;模型率定和验证分别是根据实测资料确定模型参数和模型的准确性;模型边界条件不但包括水文、气象条件,还包括边界条件数值实现过程的表现形式等;模型求解涉及代数方程的耦合和矩阵的数值解法等。要实现模型应用的正确性,必须建立合理的模型应用质量保证体系。

在具体方法的选择中,相对于问题本身的复杂性,不同关键问题处理方法在准确性、计算效率、复杂性方面必须同一量级。类似 Liberg 最小限制法则,模型准确度和计算量常常由最差的那个所限制。如果问题的处理方法准确度较低,局部提高某一问题准确性、增加问题复杂性往往是没有必要的。具体量级评定可采用专家打分定量化,当问题复杂和重要时,可以采用层次分析法等方法。当某一方法相对于研究问题复杂性在准确性、计算量、复杂性存在量级上的差异时,需要考虑对此方法进行调整。