

Analysis and Modelling of River Meandering

河流蜿蜒分析与模拟

(意) Alessandra Crosato 著

任松长 李胜阳 程献国 姜丙洲 滕翔 等译



黄河水利出版社

河流蜿蜒分析与模拟

(意) Alessandra Crosato 著

任松长 李胜阳 程献国 等译
姜丙洲 滕翔

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了河流形态学的基本概念,回顾了河流形态学的研究历程和主要研究成果,提出了一整套分析与模拟蜿蜒弯曲型河流形态学表现和演变的技术方法,并在此基础上建立了先进、成熟的模型工具。本书既注重理论探讨,又体现河流形态学研究和应用的实践;既有数学分析与模拟技术的分析和探讨,又充分结合真实河流的现场分析调查和实验室模型试验的验证分析。该书是一本难得的河流形态学分析和模拟技术参考书。

本书可供河流形态分析及模拟技术人员、河流工程技术人员、大专院校相关专业教师和学生、河流治理机构管理者、决策者,以及其他相关工程技术和研究人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流蜿蜒分析与模拟/(意)亚历山德拉(Crosato,
A.)著;任松长等译. —郑州:黄河水利出版社,2011.5
书名原文:Analysis and Modelling of River Meandering
ISBN 978-7-80734-972-3

I. ①河… II. ①亚… ②任… III. ①河流-形态
分析 IV. ①TV14

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第258093号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:13.5

字数:310千字

印数:1—1 000

版次:2011年5月第1版

印次:2011年5月第1次印刷

定价:48.00元

著作权合同登记号:图字16-2010-188

序

当前,黄河治理开发与管理正在经历着信息化建设的进程。实现信息化的关键途径是数字化,即建设“数字黄河”工程。基于“数字黄河”工程在数据采集、数据传输、数据存储和数据处理方面取得的长足进步,黄河水利委员会提出当前要着重推进数学模拟系统建设,以进一步提高“数字黄河”工程对黄河治理开发与管理的决策支持能力。黄河下游河道水沙演进模型就是黄河数学模拟系统的重要组成部分。

黄河下游河道的水沙演进过程,是洪水与沙质河床、河岸相互影响、相互作用的过程。小浪底至花园口河段的洪水增值异常现象、高村至孙口河段的“驼峰”问题,进一步反映出洪水演进过程的复杂性、多维性,需要认识和分析其内在的自然规律,进而建立数学模型,对洪水演进做出预测,并通过预测指导黄河下游防洪工程的建设、管理、运行。

西方国家对河流演变和径流演进的数学模型研发较早。《河流蜿蜒分析与模拟》对长期以来关于河流蜿蜒弯曲变化的科研成果进行了系统的研究和分析,从其内容上看,最早的参考文献可以上溯到1776年,所涉及的河流遍及欧洲、亚洲、美洲,可见其关注面之广、之久。书中的研究对象是非潮汐蜿蜒型河流,重点研究其在大空间尺度上的中长期地形和平面形态变化,内容包括文献研究、水槽试验、开发MIANDRAS模型、模型的运用及对比分析等,对开发和完善黄河下游河道水沙演进模型具有重要的参考意义。

本书的译者多为黄河水利委员会派出的第一期出国留学人员。为了实现维持黄河健康生命的目标,全力推进“三条黄河”(数字黄河、模型黄河、原型黄河)建设,培养与国际接轨的青年科技人才,加快治黄现代化的进程,在教育培训经费非常紧张的情况下,黄河水利委员会毅然决定实施青年科技人才出国培训计划。自2001年起,黄河水利委员会选派了五批共60名优秀青年科技干部分赴荷兰、澳大利亚、美国等国家学习,学习了国外流域管理先进经验、江河治理开发方面的现代化科学技术,熟悉了国际惯例和规则,提高了外语水平和国际交往与合作能力,在各自的工作岗位上充分发挥聪明才智,努力工作,发挥了应有的作用。

历史已经证明,20世纪以工业革命为标志的第一次现代化,深刻改变了世界和中国的面貌。当人类社会进入21世纪,以信息革命为标志的第二次现代化浪潮扑面而来,

信息化正在成为当今世界发展的最新潮流。希望青年科技工作者加强学习、善于思考、坚韧不拔、开拓创新，从更高的层面、以更宽的视野，为黄河数学模拟系统和“数字黄河”建设做出积极贡献。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李刚' (Li Gang), written in a cursive style.

2011 年 3 月 20 日

前 言

2002 年,黄河水利委员会党组实施人才培养战略计划,第一批出国留学人员 10 人被派往荷兰的 IHE(荷兰代尔夫特基础设施、水利和环境工程教育学院),也就是现在的 UNESCO-IHE,联合国教科文组织水教育学院,本书的几位译者即是那个时期赴荷留学人员。荷兰是个小国家,但是却有着不小的水患威胁,因为它的相当一部分国土面积都在海平面以下,海岸线绕过了大半个国家,一旦北海有大的风暴潮,海水洪灾的危险就时刻存在着,而其内陆地区很多地方由于低于海平面且又地势低平,洪灾及内涝的威胁很大。荷兰还是欧洲几条大河的入海地区,其中莱茵河就是在荷兰人口稠密而发达的西南部入海的。在这样的客观条件下,荷兰人以自己的聪明才智和胆略,与来自海上和河流的洪灾威胁进行了长期的斗争。他们在沿海建立起了举世瞩目的宏大海防工程,也建立了完善的河流入海治理工程。不仅如此,他们在水科学方面的理论研究和应用研究同样也走在世界前列。计算水力学、河流及海洋动力学、河流及海岸形态学、排水与灌溉自动化管理、综合水利应用软件等多方面的研究与实践都站在了世界最先进之列。

在这样一个国家学习水利技术,无疑可以接触到西方最新的水利科学理论和应用实践。译者对现代河流形态学的兴趣产生和深入了解,正是从在这里学习开始的。译者之一的李胜阳在水信息学(Hydroinformatics)专业学习,2002 年的水信息学课程中开设有一门课,起初在课程表里的名字叫“River Morphology”,后来实际上课的时候,授课老师(Gerrit Klaassen)给发的教材封面上写着“Engineering Potamology”,对于这个名字,开始的感觉是很陌生,因为对这个英文单词“Potamology”不熟悉,或者说根本不认识它,而在词典里一查才发现,小的词典里竟然没有这个词,于是到网络上一查才发现,在英语里,这是个工程界用的外来词,来自希腊语,是个组合词,即“河流+学(课,科学)”的意思。原来,“Engineering Potamology”直译下来,就是工程河流学的意思。可是,这里还有个问题,那就是荷兰籍的老师在授课时口头上还叫做“River Morphology”。原来,这门课程名字的两英文单词组合起来以后,强调这是一门关于河流及河流形态的课程。对于这样一门课,译者是带着很好奇的心态去认真学习和体会的。在这门河流形态学课程中,译者看到了很多以简明方式介绍的河流形态学概念、理论公式和工程应用实践,获益很大,而也就从这个时候起,译者对河流形态学产生了极大的兴趣与关注。

那门课程的重点或者说它所强调的是河流形态学的一些基本概念、理论与实践的结合点及工程应用分析,特别是它对简化理论公式,并对河流形态学的演变进行定性分析和一些定量计算进行了非常简要而清晰的介绍,其中的应用例子也非常切合工程实际。譬如,一个例子是讲对河流在被“裁弯取直”之前和之后的形态学演变趋势分析和定量计算;另外一个例子是关于含沙河流引水分流前后的形态学演变分析预测与计算。这些分析计算所依据的公式和方法有别于一般的河流泥沙工程学,与后者比较则有概念清晰、理论公式简单、原理应用明确合理的特点(以译者自己的观点来看)。这说明,河流形态学

有其突出的特点和独到的工程实践应用价值,这也是译者对该学科发生浓厚兴趣的又一个重要因素。

从工程河流学(Engineering Potamology)开始,译者也关注了广义河流形态学定义之下细分领域的学术研究情况,同样惊叹河流形态学研究在不同分支的理论研究成果和工程应用实践。从不同风格和尺度上而言,至少有以下几个方面的分支:

第一,面向普通应用的河流形态学,即译者前述的工程河流学(Engineering Potamology)。它依据物理控制方程,在合理的简化条件之下,对河流形态学进行面向工程实用性的定性解释和定量计算。工程河流学在定性分析中有简单、明确的理论基础,对于河流及河流工程影响的分析解释乃至预测都非常到位。

第二,基于野外实地观测、观察和室内分析研究的应用河流形态学。这是在大量的现场实地观察、观测并与理论分析、统计分析和计算而得出的、简易实用的河流形态学理论和实践体系。这个分支的河流形态学更注重河流的实地勘察、河流地貌特点、河流形态在不同地形、地貌和地质条件下的表现形式分类和分析研究。美国人 Dave Rosgen 编写的《应用河流形态学》(《Applied River Morphology》)即是其代表作,其中有大量的现场图片和手绘图片,直观地展现了河流形态的各种特征和表现,在此基础上对各类河流形态进行了归纳和统计分析,提出了一般性规律。本书更注重实际应用,而其理论性相对较弱。

第三,基于物理机制的动力学研究和应用成果。这类研究及相关模型、软件工具等,由水力学、河流动力学等基本控制方程出发,提出了基于数学控制方程的实际应用方案,有些还开发出了成熟的应用软件。例如,在 Delft3D 软件包中就用成熟的河流形态学计算分析工具,而这里的功能更多地专注于对相对更小的河流尺度下的理论分析和计算模拟研究,例如,对一个河流弯曲(弯道)的三维水力水流(包括含沙水流)进行的模拟与分析。

第四,基于对相对较大河段的形态学特性的分析研究分支。它研究河流弯曲的演变规律和分析模拟手段。这里研究的河流尺度是连续几个弯曲河段的河流长度。同时,时间上是单个河流弯曲演变并发生实质性位移的中、长期时间段,即本书中所谓的河流工程尺度(Engineering Scale)。其研究分析手段的一个特点是应用了多学科的物理概念与知识,既有水力学和河流动力学,也有波动方程等,可以说是体现了多学科的综合应用研究。

西方现代河流形态学研究在近几十年中取得了长足的发展,也获得了丰硕成果。其中,尤以 20 世纪八九十年代最具代表性。那时,世界上出现了多个研究河流形态学的学术群体,后来这些研究群体产生了不少形态学研究的专家,这其中有三个群体很有代表性,以地域划分就是,荷兰的代尔夫特(Delft)研究群体、美国的明尼苏达(Minnesota)学术群体和意大利的热那亚(Genoa)学术群体。这个时期是河流形态学知识迅速发展的时期,很多基础性发现都是这个时代所取得的,上述学术群体对后来的河流形态学研究产生了重要影响。

基于这些认识,当译者偶然看到 Alessandra Crosato 所著的本书英文版时,立即被书的内容吸引住了,该书的研究即是属于上述第四个方面。

本书原作者于 1987 年在荷兰代尔夫特技术大学(Technical University of Delft)完成了河流形态学研究的高质量的博士论文,但她当时选择去法国就业了,后来她又回到代尔夫

特从事河流形态学研究和教学工作,并进一步补充了新的研究成果,最后于2008年8月进行了博士答辩。当初没有答辩不是因为论文未完成,而是选择了去法国就业。之后,她继续进行更加深入的理论研究和最新发展跟踪分析,更加完善了自己的研究成果。从这个意义上讲,她的研究成果就更加殷实而丰硕。在她答辩的时候,她就早已经是业界一个很知名的专家了。因此,选择翻译她的书恰能达到在我国传递西方河流形态学研究成果的目的。该书极其详尽和准确地描述了学术流派、理论基础、各派大专家的学说与成果以及应用流域,这一点也是本书非常突出的一个特点,而能够做到这一点,与原作者几十年不断耕耘、密切跟踪和潜心研究是密不可分的。据了解,由于原作者在业界的知名度很高,她本人与国际上知名专家的交流频繁,这也更促进了她的学术研究。同时更为重要的是,原作者将自己几十年的研究成果详细地进行了阐述,因此这本书既是关于过去几十年业界研究历程的分析、记录的书,同时又是原作者最新研究成果介绍与分析的书,是一本难得的好书。

本书英文原作者长期从事河流形态学研究,既是这个时期的亲历者和见证者,同时也是后续研究的延续者。而本书在回顾河流形态学研究的历程,特别是自20世纪80年代以来的形态学研究发展的背景下,更专注于蜿蜒型河流(Meandering Rivers)形态学的研究、分析与模拟计算。它着重研究河流的各种形态学表现形式、形态学表现的诱因、形态分析和模拟预测等。本书译者来自黄河水利委员会,而黄河是一条世界闻名的多沙大河,从发源地直到入海口,就不同河段的形态学表现而言有其自己的特点,但是黄河的很多形态学表现形式也是遵循了河流形态学的一般规律,例如,下游的弯曲河段和其下游的所谓窄河道归顺河段等就带有大河流下游的一般性特点,因此译者认为,本书中文版的出版发行将对黄河及国内其他河流的认识、治理和开发具有一定的现实意义。

在本书的翻译中,任松长负责翻译第2、3章,并负责全书统稿,程献国负责翻译第4、5章,李胜阳负责翻译第7、8章,滕翔负责翻译第9、10章,姜丙洲负责翻译第1、6章。由于河流形态学有其独特的研究视角和应用领域,与我国的教学、研究和应用的某些传统领域的重合和交叉较少,因此有很多概念、理论和应用实践是新的,这对于译者的翻译是个极大的挑战。在本书的翻译过程中,译者之一的李胜阳借助于在荷兰攻读博士的机会,多次与原作者进行了面对面的直接沟通和交流,对于不明确的概念进行了认真的了解和消化,并及时与其他参与翻译的人员进行沟通并明确共识,这在很大程度上保证了翻译的准确性。同时也应该看到,由于本书内容相对新颖的特点和译者的水平所限,对本书的翻译难免出现不足和缺陷,还请读者给予谅解和积极反馈与支持,对于不当的地方,恳请广大读者朋友提出宝贵意见和建议,以便今后改进。

译者

2010年12月

原作者序

值此汉语版出版之际,我想对我的这本书作一个简单介绍。首先,我对李胜阳先生推荐翻译我的著作表示由衷的感谢!将我的书翻译成汉语出版使我感到莫大的荣幸和自豪。我还要衷心感谢所有的五位翻译人员!他们是任松长先生、李胜阳先生、程献国先生、姜丙洲先生和滕翔先生。本书的翻译工作绝对不是简单的英语单词对应于汉语词汇的直接翻译,它需要翻译者对原著有一个完整的学习、思考 and 综合理解过程,他们必须要把复杂的概念用一个汉语中新的技术术语来准确表达出来。为了保证翻译的质量,在翻译过程中,我跟李胜阳先生有过多次交流。从我们的讨论中我认识到,尽管李胜阳先生和他的同事们不是河流形态学的专家,却对相关基础知识和我的研究领域都有着很好的理解。因此,我对他们翻译出高质量的书充满信心。

据我了解,中国河流工程界对河流形态学变化的研究相对较少,因此我的书汉语版的出版可以被看做是介绍本学科的一项开创性的、基础性的工作。读者在了解我的研究的同时,还可以从我的书中了解到过去 20 年中本领域内知名研究者提出的概念,了解到他们的研究方法和他们的研究成果。

本书研究蜿蜒型河流的(形态)动力学。书的前 4 章介绍了河流形态学的基本概念,相信这些介绍对于还不太熟悉河流形态学学科的中国同行们将很有益处。本书的其他章节介绍了蜿蜒型河流平面形态变化的数学和数值模拟技术,其中包括了本领域的最新研究成果。本书中还包含大量的文献引用,而这对那些希望进行更多了解和研究的读者提供了直接和便利的文献信息。本书汉语版的及时出版确保中国读者能够及时、准确地了解到蜿蜒弯曲型河流形态学研究的最前沿成就。本书所论研究中开发的 MIANDRAS 模型,可以看做是“开放源码”模型,若中国同行需要,本人将乐于提供。同时,我欢迎大家对我的著作反馈信息。

Alessandra Crosato

2010 年 12 月 9 日

目 录

序

李国英

前 言

原作者序

第1章 绪 论	(1)
1.1 基本原理	(1)
1.2 研究背景	(3)
1.3 研究目标	(4)
1.4 研究方法	(5)
第2章 蜿蜒型河流	(7)
2.1 概 述	(7)
2.2 冲积性河流的蜿蜒及其他平面形态	(7)
2.3 蜿蜒型河流的平面参数	(10)
2.4 河床地形	(12)
2.5 流 量	(13)
2.6 泥 沙	(14)
2.7 弯道水流	(15)
2.8 河道迁移	(16)
2.9 裁弯取直	(22)
第3章 河流蜿蜒控制因子	(24)
3.1 概 述	(24)
3.2 平面形态分类	(24)
3.3 水流强度	(29)
3.4 泥沙补给	(30)
3.5 河岸的侵蚀性	(30)
3.6 岸栖植物	(31)
3.7 洪水频率	(34)
3.8 活动构造	(34)
第4章 河流蜿蜒变化模拟研究现状	(36)
4.1 概 述	(36)
4.2 弯曲河道水流流场和河床形态模拟	(36)
4.3 河岸侵蚀和后退的模拟	(39)
4.4 河岸沉积与延伸的模拟	(44)
4.5 裁弯取直模拟	(46)

4.6	蜿蜒迁移模拟	(48)
第5章	蜿蜒迁移模型 MIANDRAS	(52)
5.1	概 述	(52)
5.2	水流速度和水深的数学描述	(53)
5.3	河岸后退与延伸的数学描述	(68)
5.4	裁弯取直的模拟	(69)
5.5	河流走廊宽度的估算	(70)
第6章	自由滩形成的顺直型水槽试验	(72)
6.1	概 述	(72)
6.2	试验准备	(72)
6.3	试验 T1	(74)
6.4	试验 T2	(77)
第7章	模型表现分析	(80)
7.1	概 述	(80)
7.2	近岸水流流速和水深变化	(80)
7.3	水流流速滞后	(87)
7.4	河流蜿蜒的形成	(89)
7.5	蜿蜒弯曲和交错编织	(94)
7.6	点滩移动和弯曲增长	(101)
7.7	与其他类型蜿蜒迁移模型比较	(107)
第8章	数值分析	(113)
8.1	数值计算	(113)
8.2	计算的稳定性:时间步长与空间步长比较	(121)
8.3	弯曲移动模型中平滑处理和重划网格的影响	(121)
8.4	边界条件的影响	(126)
第9章	野外应用	(135)
9.1	概 述	(135)
9.2	局部迁移速率与河道曲率	(140)
9.3	平均移动速率变化与河流蜿蜒度增加	(144)
9.4	荷兰 Geul 河当前河道形态变化趋势预测	(147)
9.5	托莱索里河(孟加拉国)河道平面形态变化预估	(152)
9.6	阿利埃河(法国)形态变化预测	(156)
第10章	结论与建议	(164)
10.1	研究范围与建模方法	(164)
10.2	蜿蜒的产生	(164)
10.3	蜿蜒的波长	(165)
10.4	河流蜿蜒的条件	(166)
10.5	流速与河床地形之间的滞后距离	(166)

10.6	点滩位置与弯曲顶点的关系	(167)
10.7	弯曲锐度对局部迁移速率的影响	(167)
10.8	平均迁移速率与蜿蜒发育	(168)
10.9	河道横断面上的滩数量	(168)
10.10	模型适用性	(169)
10.11	数值计算的效果	(170)
10.12	河床坡度等于河谷坡度除以蜿蜒度的假定	(170)
10.13	迁移系数	(171)
10.14	对未来河岸淤积研究的建议	(172)
参考文献		(174)
主要符号表		(198)
作者简历		(202)

第 1 章 绪 论

1.1 基本原理

蜿蜒型河流 (Meandering River) 的平面演变, 常伴有河弯的逐渐发育、迁移以及自然裁弯现象的发生, 是河流平面形态变化的一种基本形式。这种演变不仅对河流本身的科学研究有着重要价值, 而且对于河流的治理和在河流上建设有关工程都有着重要的意义。尽管在近几十年来, 这方面的研究取得了很大的进步, 但是人们在建立简单的模型以便应用模型对河流蜿蜒变化进行预测和分析方面仍然很欠缺。而这类模型是分析和理解河道弯曲变化现象的重要手段, 并且这样的简单分析模型和工具对理解更复杂的模型也很有帮助, 后者往往研究范围是更小的河流。

本书研究的对象是非潮汐影响的弯曲河流变化, 并着重研究大尺度、中长期情况下, 河流在二维平面上的演变。这个时间和空间上的尺度称为工程尺度, 其目的是研究并应用一些在本领域中尚欠缺的知识, 并以其为工具来更好地理解河道在平面上的演变。本书包括开发一个用于模拟中长期河流蜿蜒变化的数值模型, 即 MIANDRAS。同时, 还有试验和实地观测研究等, 而数值模型中包括了分析研究工作中所用的主要工具。

为什么研究河流的蜿蜒变化?

因为河流的蜿蜒变化是人类与河流共处环境中河流变化的最常见的形式。

蜿蜒型河流有单一的河道流路、多弯的形态以及近似不变的河道宽度。它们可以被认为是辫状型河流 (Braided River) 的一种特殊形式 [Murray 和 Paola, 1994], 即在此种情况下, 多股水流减少为一股。为何本书集中于这一形式呢? 这有以下几个原因:

(1) 自然形成的蜿蜒型河流多见于广袤而肥沃的流域, 这些地区最适合农业生产和人类居住, 常常面临人口膨胀和经济发展的压力。因此, 洪泛平原的人口和工业日益密集 [Muhar 等, 2005]。这样一来, 防洪、河岸侵蚀和河弯移动的治理等就显得尤为重要。以前很长一段时间, 很多欧洲国家, 如荷兰、意大利和法国等, 地方政府在规划人类居住地时从不考虑流域层面的协调; 而现在则认识到, 就长期而言, 人们占据洪泛平原并加高堤坝来减少河流的变化的做法不具有可持续性。对冲积平原的不断侵占将导致更高的洪水水位, 而防护堤却不可能无限加高。因此, 需要制定一个全新的土地利用政策, 给河流更多的空间。最新的管理思路 [Silva 等, 2004; Ercolini, 2004] 引入了“河流走廊” (River Corridor, 或称 Streamway) 的概念, 并提出了“给河流自由空间”的口号 [Malavoi 等, 1998; Malavoi 等, 2002]。河流走廊是一个人工维持的、常过洪水的河流冲积带, 在这样的区域内, 允许河流在一种被控制的“自然”状态下冲刷河岸。无控制的河岸侵蚀会影响到土地的使用, 而自由的蜿蜒变化也会对通航产生影响。因此, 对河流走廊的规划设计来讲, 有关河岸侵蚀过程、弯曲演变和裁弯等方面的认识必不可少 [Piégay 等, 2005; Larsen 等, 2006]。

此外,研究表明,由于牛轭湖、河弯池、凸岸边滩(Point Bar)和垂直河岸侵蚀等的存在,水深、流速和泥沙组成等的自然梯度对河流走廊的生态有重要作用[Ward 和 Stanford, 1995]。因此,需要深层的河流形态动力学知识来设计和维护河流走廊,分析评估重要河道整治工程的长期影响,其中包括对是保持一个河弯还是进行人工裁弯取直的分析与选择。

(2)在发达地区,人类的干预已经使得河流的蜿蜒现象成为一种最常见的河流平面形态。例如维也纳以下的多瑙河曾经是辫状形态的,而现在被限制成为单股蜿蜒水流。就像多瑙河一样,大多数山区河流越来越呈现出蜿蜒型河流的形态。建坝、开挖和河道采砂等是河道形态转型变化的主要诱因[Cencetti 等, 2004; Surian 和 Rinaldi, 2003; Piégay 等, 2000, 2006]。在欧洲,近些年偏远地区和山区人口因逐渐迁徙到城镇而减少,导致树木植被增加而土壤侵蚀减少,使得进入河流的泥沙减少,继而造成河流冲刷加剧,河型变化现象更加突出[Piégay 和 Salvador, 1997; Liébault 和 Piégay, 2002]。

(3)公园和恢复性工程的设计多采用单股蜿蜒河型的方案,同时渠化河道的蜿蜒塑造模型也得到发展[Abad 和 Garcia, 2006]。社会学方面的一些因素也在辫状河流转变为蜿蜒型河流的过程中发挥了一定的作用。就两种河流形态而言,公众更喜欢蜿蜒型河流[Parker, 2004; Piégay 等, 2006],正因如此,河道改造工程常以蜿蜒单股河道为目标来进行。在美国,有些河道改造工程失败了,因为新改造成的蜿蜒型河道很快又转变成辫状河道[Kondolf 和 Railsback, 2001]。这一现象再次表明,揭示河道蜿蜒原因及其适宜条件意义重大。

本书开发了蜿蜒移动变化模型 MIANDRAS 作为主要分析研究工具。该模型是基于准二维流场和河床地形描述的一线模型,含有河岸侵蚀堆积公式。该模型在研究前期阶段已经开发完成[Crosato, 1987, 1989, 1990]。

为什么用 MIANDRAS 这样相对简单的模型作为主要工具来研究河流的蜿蜒变化呢?下面让我们来讨论这个问题。

到 2000 年初,河流形态动力学模型已经发展到相当复杂的程度。诸如 Delft3D 模型[Lesser 等, 2004]、MIKE21 模型(www.dhigroup.com)和 SSHIM 模型[Olsen, 2003]等模型,均可进行水流和泥沙输移的二维和三维模拟,同时还可进行河床高程变化计算。这些模型包含很多复杂机制的描述,如弯道水流中的螺旋水流和泥沙分级输移等,但是这些计算与精度不高的河岸侵蚀计算公式进行了耦合。基于物理机制的河岸侵蚀模型被嵌入在二维模型中,例如 RIPA 模型[Mosselman, 1992]和 MRIPA 模型(改进的 RIPA 模型)[Darby 和 Thorne, 1996a],然而,这些模型对伴生河岸的处理却没有达到与二维模型同样的复杂度。MIANDRAS 模型对水流、泥沙输移和河岸动力学计算三者有着更加平衡的考虑。此外,所有现有多维模型都不包括河岸的延伸增长过程,这些延伸增长过程是由近岸淤积的稳固以及其垂直方向上的增长引起的,并受水边植被和土壤固结控制。河岸延伸是河流蜿蜒变化的基本过程之一,同时它与河岸蚀退过程相伴。这一缺失严重影响了这些模型在研究蜿蜒型河流平面变化方面的实用性。

本书着重研究大尺度、中长期情况下的蜿蜒型河流的地形变化,即河流在数十年或数百年时间跨度中发生的数个蜿蜒的演变。对于此类研究,那些更复杂的模型没有表现得

更好,也未必减少不确定性。MIANDRAS 模型特别适合在大的空间和时间尺度下对蜿蜒型河流行为进行分析,这一点已经得到证实。其简化的数学处理便于获得一些特定条件的解析解,例如初期形成的蜿蜒态势、平衡河床地形和凸岸边滩位置等,而这些提供了模型所模拟过程的有关信息。因而,数值分析可以与数学分析相耦合。由于缺少河岸侵蚀和淤进的合适公式,更为复杂的模型要么使得一些大尺度现象的模拟成为不可能,要么使其更加困难。

与 MIANDRAS 模型相比,许多新开发的蜿蜒演变模型仍然包含更简化的基础物理过程计算[Lancaster, 1998; Abad 和 Garcia, 2005; Coulthard 和 van de Wiel, 2006]。最复杂的一些模型[Sun 等, 1996; Zolezzi 和 Seminara, 2001]也没有超过 MIANDRAS 模型。这意味着尽管类似模型已经出现,但 MIANDRAS 模型仍然处于蜿蜒变化模拟的最前沿。

需要指出的是,通过对 MIANDRAS 模型中基本公式的不同程度的简化,可获取不同复杂程度的模型,本书框架之下的数值方法可用于分析所有蜿蜒迁移模型的应用效果[Crosato, 2007a, 2007b]。经验证,这对于定义控制蜿蜒型河流变化某些方面的参数很有帮助。

1.2 研究背景

在 1987 年本研究开始的时候,蜿蜒型河流变化各主要方面的研究都在进行之中。例如,1983 年“代尔夫特小组”^①对“过度响应”(Overshoot)现象开展了研究[De Vriend 和 Struiksmma, 1984; Struiksmma 等, 1985]。他们在模拟弯曲河道水流和河流形态之间的相互作用时发现,这种相互作用将引起在河弯入口处横向河床比降的局部过度变化和下游方向上的稳定河床波动。De Vriend 和 Struiksmma 因河道航运问题对凸岸边滩高程的过度变化现象尤其感兴趣,并把他们的发现称做过度响应现象。与此对应,河流对岸水深进一步加深,从而增加河岸的不稳定性,这个现象被“明尼苏达小组”称做过度刷深(Overdeepening)现象[Johannesson 和 Parker, 1988]。“热那亚小组”发现了“共振”现象,即在蜿蜒型河道上沿着河流方向随着时间的推进,边滩与河湾不断地共同发展[Blondeaux 和 Seminara, 1984, 1985]。实际上,过度响应、过度刷深和共振现象是同一河流现象的不同侧面,都是河流系统对水流扰动的自由响应。当这种自由响应具有无阻尼波动特征、并与起控制作用的蜿蜒发展有相同波长时,共振现象发生。后续几年里,针对这一现象开展了分类研究[Parker 和 Johannesson, 1989; Mosselman 等, 2006]和野外及实验室试验研究。

本研究最初的目的是验证 Olesen (1984) 的观点,即过度响应现象会通过影响河岸侵蚀而导致顺直河流开始向蜿蜒发展。当时认为,蜿蜒的发生归因于以下几个方面:

(1)(顺直)河道河床的小扰动到移动交替滩的发展,被称做滩不稳定性理论[Hansen, 1967; Callander, 1969; Engelund, 1970, 1975; Parker, 1976]。

(2)无限小河弯的侧向发展,被称做弯曲不稳定性理论[Ikeda, Parker 和 Sawai, 1981]。

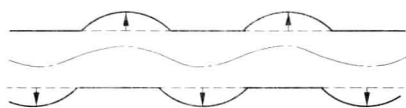
① 这里的“小组”是指本研究领域在 20 世纪 80 年代前后以地域来区分的研究人员群体,译者注。

(3)共振现象的产生。

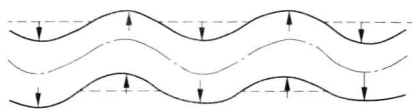
(4)过度响应现象的产生(上游水流干扰引起水流与河床的稳定扰动)[Olesen, 1984]。

(5)大尺度紊流的产生[Yalin, 1977]。

利用本研究开发的数学模型 MIANDRAS [Crosato, 1989] 和由 Johannesson 与 Parker (1989) 等开发的类似模型,模拟演示了顺直河道在有上游干扰的情况下,发展为蜿蜒平面形态的过程,这证明过度响应和过度刷深会引起蜿蜒的发生。然而,这个发现并没有排除其他诱因。另外,关于河流蜿蜒起始的理论可以解释为什么河道趋于蜿蜒,但河流蜿蜒远不只这些。所有理论都关注于河岸侵蚀与河岸后退的速率,没有研究对岸以相同速度延伸的情况。不管怎样,正是这一现象造成了辫状河道和蜿蜒型河道的区别(见图 1-1)。蜿蜒型河流的形成,要求在长时间内,河岸后退速率与对岸延伸速率相互平衡。如果河岸后退超过河岸延伸,河道会变宽,且由于河心滩的形成或切割凸岸边滩,在某处会形成多股水流的平面形态。如果河岸延伸超过河岸后退,河道会变窄,并发生淤积。结果,滩和河弯的不稳定性以及过度响应或过度刷深现象塑造了水流弯曲的条件,但是这些还不足以使河流产生蜿蜒型平面形态。



(a)有河岸后退,无河岸延伸的顺直河道形态



(b)河岸的退后和延伸相互平衡的蜿蜒型河流形态

图 1-1 弯曲的水流不足以形成蜿蜒

所有现有的河流蜿蜒迁移模型,包括 MIANDRAS 模型,都假定河岸后退和对岸延伸速率相同。这是模拟蜿蜒型河流演变的必要前提,但这并没有明确地考虑发生蜿蜒演变的所有影响因素和过程。而且,由于河岸延伸影响对岸的后退,包括 MIANDRAS 模型在内的大多数模型所采用的河岸变化参数实际上是参数组,该参数组也考虑了对岸的变化。

河岸延伸过程复杂且研究很少。本书指出了描述该过程的可能途径,为蜿蜒迁移模型开发打下了基础,该模型可用于分辨和模拟河岸的延伸和后退。然而,由于缺乏观测和现场实测资料,本书不能独立解决这个问题,尤其是不能回答什么是最终导致蜿蜒型河流或辫状河流形成条件这一困难问题。所以,本书也将就此问题的研究作为目标。

1.3 研究目标

本书研究的主要目标是对大尺度、中长期(工程尺度)情况下的蜿蜒型河流现象进行

分析和模拟。中长期是指侧向的蜿蜒变化量可以用河流走廊的宽度来标定的时间尺度；而大尺度是指数个河道弯曲以上的长度。

本书将着重探讨以下问题：

- (1) 分析蜿蜒型河流的特点和相关演变过程(第2章)。
- (2) 识别河流蜿蜒变化的控制因素(第3章)。
- (3) 阐述最新技术并找出尚需进一步研究的问题(第4章)。
- (4) 研究并开发用于分析河流蜿蜒变化的数学模型(第5章)。
- (5) 分析水槽试验条件下过度响应/过度刷深现象发生的条件(第6章)。
- (6) 用数学分析法和试验数据验证法进行模型表现分析(第7章)。
- (7) 分析本书所论模型的预测精度极限,并与其他不同复杂程度的现有模型进行比较(第7章和第8章)。
- (8) 模型求解与数值实现(第8章)。
- (9) 用实测数据来测试模型(第9章)。
- (10) 解释实测河流蜿蜒的一些特定现象(第10章)。
- (11) 提出对未知问题的研究计划(第10章)。

1.4 研究方法

首先就河流蜿蜒变化的相关研究进行广泛的文献阅览,并着重阐述以下几个方面的问题：

- (1) 不同时间和空间尺度下的变化过程。
- (2) 控制河流平面形态形成的因素。
- (3) 最新研究成果。
- (4) 本领域尚需研究的问题。

在此基础上,本研究将专注于大空间尺度、中长期时间尺度下的蜿蜒现象研究,例如蜿蜒迁移、河弯发育和河流蜿蜒变化。为了能够研究这些过程,我们开发了基于数学和数值方法的模型。这个模型大体上描述了作为时间函数的河道轴线位置,考虑了过度响应和过度刷深现象的作用,并考虑了流场中河道中心线弯曲度、河床地形以及河岸后退或延伸等因素。这可以通过运用泥沙输移公式和泥沙平衡方程对弯曲水流动量方程和连续性方程进行耦合获得。由于河道变迁是一个相对缓慢的过程,因而河岸侵蚀率可与近岸均匀流特性建立相关关系。在变化流量条件下,模型则考虑了河床演变的时间效应。通过对基本方程的不同程度的简化,可以获得三个不同复杂度的蜿蜒变化模型：

(1) 无滞后的运动学模型。该模型将河岸后退与局地河道中心线曲率直接相关,没有任何空间滞后。现有的运动学模型利用迁移速率(Migration Rate)和河道曲率之间的经验空间滞后来描述下游蜿蜒迁移[Ferguson, 1984; Howard, 1984; Lancaster 和 Bras, 2002]。这里所说的无滞后运动学模型不具有这一特征。

(2) Ikeda 类模型(在 Ikeda 等(1981)之后出现)。在这类模型中,河岸后退和河道中心线曲率之间的空间滞后由水流的动量方程和连续性方程来获得,这就产生了一个体现