

[美] 张海燕 著



河流演变工程学

科学出版社

河流演变工程学

[美] 张海燕 著

方 铎 曹叔尤等 译

科学出版社

1990

Howard H. Chang
FLUVIAL PROCESSES IN RIVER ENGINEERING
John Wiley & Sons, Inc., 1988

河流演变工程学

[美] 张海燕 著

方 铎 曹叔尤等 译

责任编辑 李增全 彭 斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年7月第一版 开本: 787×1092 1/16

1990年7月第一次印刷 印数: 19 3/4 插页: 3

印数: 001—700 字数: 451 000

ISBN 7-03-001715-3/P·333

定价: 21.90元

译 序

美国加利福尼亚州圣迭戈大学张海燕教授长期从事流体力学、河流泥沙、水文、河流工程等领域的教学、科研和咨询工作,建立和完善了 FLUVIAL-12 等一系列河流数学模型,发表了 100 余篇论文和研究报告,曾任美国 ASCE 泥沙专业委员会主席、圣迭戈大学土木系主任和 ASCE 会刊 *Journal of Hydraulic Engineering* 副主编,是河流泥沙领域的知名学者。

《河流演变工程学》一书于 1988 年在美国出版(英文版)。该书反映了西方河流泥沙领域的最新进展,是作者二十余年从事河流泥沙工作的心得和经验的总结。本书出版后,即被美国国内外一些大学选作研究生教材。全书分四篇,共十五章,分别论述了河流地貌、河流演变基础、准衡河流及其反应和河流工程等课题。本书内容简洁、取材新颖、条理清晰、概念明确、密切结合工程问题,既有理论基础,又有实践经验,特别在河型、河流的自动调整机理等重要理论或方法的处理和弯道变形、河宽调整和河床冲淤的数学模拟等方面很有特色。对过去仅能定性描述的某些河流问题提出了定量的处理办法,配合各类问题列举了大量工程实例。无论在河流理论上还是在河工实际中都很有参考价值。

我国河流泥沙领域的研究在世界上有重要地位,近年来更取得了显著的进展。为了便于我国的河流泥沙工作者对西方的最新研究进展有系统的了解,我们将《河流演变工程学》一书译成中文出版。参加翻译工作的,按各章顺序为:方铎(第一、二、六章)、陈远信(第三、四、十五章)、蔡金德(第五、八章)、樊从良(第七章)、刘新年(序言和第十章)、陈家扬(第十一、十二章)和曹叔尤(第九、十三、十四章)等,方铎教授主持了这项工作。彭荣阁教授对第三、四、七、十五章作了初校,蔡金德研究员对第十一、十二章作了初校。方铎和曹叔尤对全书译文进行了校阅和修改。在翻译出版过程中始终得到张海燕教授和科学出版社第三编辑室李增全主任的热情支持和悉心帮助,在此表示感谢。

有关专业术语的中文翻译,主要参照了钱宁等的《河床演变学》一书。个别在现有中文专著和文献中极少出现的术语,我们结合上下文给出了相应的中文翻译。尽管我们力求翻译准确,由于水平所限,难免有错误之处,请予批评指正。

方铎、曹叔尤
1989年3月于成都

中文版序言

中国绝大多数人口集中在河流冲积平原,因此,从古至今治河是一项迫切的工作。如果说万物皆有生命,则河流亦然,了解河流生命的特征则是治河的基本前提。河流的生命溯源至太阳能与地心引力。太阳能产生雨量,降雨成流水,汇细流而成川。太阳能与地心引力交互作用予河流以生命;水流与泥沙相互作用而形成河相地貌。河流研究必须先了解水力学与泥沙运动。治河的基本思想建立在对河流形成与应变的认识上。一般而言,河流工程以水力学、泥沙运动等为基础,以河相形成与应变为应用。

河相学的困难,在于有关的变量很多,而可以应用的物理或数学条件不够。为了确定河深、河宽、蜿蜒的形成发展、长期与瞬时的变化等等,必须有足够的条件。在河流问题的计算中,明渠水力学的原理(如连续方程、运动方程、阻力公式等等)可用以求得水面高程、流速、剪力等水力条件。输沙公式则用来计算泥沙运动。但这些方法不足以解决河相的问题。本书对河相的形成与冲积变化提供了一些理论的基础,这些理论符合中国的哲学思想,认为天地间万物趋于和谐。这个趋势表现在冲积河流上有两个趋向性,其一为单位河长的能耗率趋于最小,其二为能耗率在一河段中趋于沿程均匀化。本书通过河流的趋向性,并结合水力学与输沙原理,来解释河相的形成与应变,同时对这些问题提供一些解析的方法。

在河流中,环流起于水流在横向的分速。在河流水力与河相学中,环流与蜿蜒的河型有密切的关系,是不可忽视的现象。本书内容包括环流的形成及沿程的消长,并有环流在河相的应用。

近年来,电脑的运用产生了数学模型,各种解析方法得以应用于河流计算,使数学模型逐渐成为一种主要工具。一般而言,数学模型有一维、二维与三维之别,也有恒定流与非恒定流之异。本书所介绍的限于一维与准二维模型。全二维与三维模型不在本书范围之内。准二维模型系以河流中心线为纵坐标,以河槽断面为横坐标。水流计算基本上属一维,包括水面高程与环流的沿程变化、各种水沙条件与河床冲淤在横向的变化、河宽的变化、以及环流引起的横向输沙与河床应变。全二维模型一般不用河流断面而用网格确定河槽几何形状。纵横两个方向的流速以解两方向的运动方程而求得。全二维模型采用垂向平均流速而不考虑垂向流速变化,因此无法考虑重要的环流现象。由于这一点,全二维模型不甚适用于河流,但较适用于水库、河口与海湾。三维数学模型需要高度的电算技术,尚在发展阶段,虽然三维水流计算已有一定进展,但仍须相当的发展以克服泥沙运动与河槽变形计算的困难。同时,电算耗时太多仍是一大障碍。

本书的内容,限于本人对河流问题的了解与经验,对整个冲积河流的课题尚有许多未曾涉及,例如高浓度泥沙问题与有限元数学模式等。综上所述,目前在河流方面的知识范畴已远超过十年前的领域,但是尚未解决或未充分解决的问题仍有赖于中外河流泥沙工作者的继续努力。

由于作者个人的经验,本书多偏于西方的发展。在河流科学方面,中国在世界上有重要的地位,近年来的发展更为明显。研究成果刊载于水利、泥沙与地理等专业学报及有关国际河流泥沙领域的论文集。在专著方面,有《泥沙运动力学》(钱宁、万兆蕙著)、《河床演变学》(钱宁、张仁、周治德著)、《河流泥沙工程学》(武汉水利电力学院编著)和《河流过程原理》(侯晖昌著)等等。

本书中文版的由来溯源于成都科技大学方铎教授。方教授与水利系同仁有意选择一部西方关于河流工程的最新专著介绍给国内同行。为此拟定了初步计划,正巧该系曹叔尤先生于1987年4月来到我校进修,同时也为译书一事作了联络与促成。成都科技大学水利系的同仁们对译书工作非常热心,因此在短期内完成了这项工作。

目前在中国出版书籍有较大的困难,主要是书籍出版的成本大于销售所得,这个逆差在科技专业书籍中更为严重。本书的中文版有赖于多人的联络与努力,得以与科学出版社商榷而订立合同。在这里要感谢中国科学院自然科学史研究所戴念祖、水利学会戴定忠、铁道研究院陆浩、水利水电科学研究院曾庆华诸先生的热心与努力。最后要感谢科学出版社李增全先生的精心安排使中文版的出版得以实现。

张海燕

1989年于圣迭戈

英文版序言

自古而今,河流都是人类活动的中心。河流既造福于人类,又会带来洪水及其它河流灾害。当工程师们对供水、渠道设计、防洪,河道调整、航道整治等问题感兴趣的同时,也清楚地认识到:河流作为大自然的一部分,非强力所能控制,而只有通过认识才能掌握。河流长期以来就一直是从从事河流几何形态的自动调整及其对自然变迁、人类活动的反应等研究工作的工程师和科学家的研究课题之一。除工程外,认识河流的特性对改善环境亦是必要的。很少其他领域的研究能像人们对河流的研究那样广泛。然而,水力学、沉积学和河床演变学的一些主要问题仅仅是近几年才被认识,当然,还有许多其它问题仍未被认识。

由于河流具有自由水面,所以属于明渠水流。确定定床水面线需大量的知识。而河流的边界都是自由面,正如 J. F. Kennedy 1982 年在水力工程杂志上所述。河道水力学和河床演变学比定床更为复杂。如宽度的自动形成及其调整的解析确定仅在近几年才变成现实。宽度调整仅是河流演变学的一个方面,它与河流演变学的其它几个方面,如深度、弯道形态等密切相关。

河流研究的最新进展,由于沉积和侵蚀问题的引入,已超出了输沙水力学的范畴。已取得的大量成果为冲积渠道设计、河渠形态及河道变形的数学模拟提供了分析方法。作者撰写此书的目的就在于把河流研究的最新成果搜集在一起,而这恰恰是所必需的。

一些基本原理和应用方法在本书中作了介绍。由于河流工程和冲积地貌学的密切关系,著者将工程原理和地貌学的方法联系起来。河流是冲积系统的一部分,书中用系统的观点进行了分析。主要参考文献的引用和本书的侧重点是由本人阅历和兴趣决定的,可能与别人的不同。

通过授课、科研和咨询工作,著者已接触过许多需要作工程分析和处理的问题。解决这些问题的途径已由包括我自己在内的众多科学家和工程师发展起来。这些途径的基础是河道水力学和河流演变学的普遍规律,本书中的大量问题实际上受河流演变学普遍原理的控制。

本书主要作为土木系高年级大学生和研究生的教科书,用于河流泥沙工程课程。该书的内容相当于大学 3 至 4 个学分的内容。学习该书的必备知识包括数学(微积分学和微分方程),计算机程序和基础水力学方面的基本训练。本书亦可作为直接从事防洪,泥沙,河床演变,桥梁设计,水道和灌溉等方面工作的工程技术人员的参考书。本书同样对从事水力学,农业工程,地貌学,环境科学及地理学方面的研究人员适用。

我致力于河流研究的启蒙人是 D. B. Simons 和 S. A. Schumn, 在此谨向他们表示衷心的感谢。我还要向 J. C. Hill, V. M. Miguel Ponce, V. A. Vanoni 和 C. Ted Yang 深表谢意,本人在和他们的学术交流中受益匪浅。

内 容 简 介

本书的主要内容包括河道水流,河渠形态,河道物理特性,河流对自然变迁、人类活动的反应及其设计、评价的分析方法。广泛地介绍河流演变和河道工程须建立在冲积地貌学、河道水力学、泥沙输移的基础上。根据这一逻辑,本书由如下五个部分组成:

- 第一篇 冲积地貌学;
- 第二篇 河流演变基础;
- 第三篇 准衡河流及其反应;
- 第四篇 河道变形的数学模拟;
- 第五篇 河道工程。

第一篇为冲积地貌学,介绍河流系统(包括河流及流域)观点。该篇基本上用地貌的分析方法概括了许多与河流有关的基础知识,如冲积河流的变量,准衡概念,造床流量,河流分类,水力几何形态,弯道平面形态,河床形态的临界条件和河流反应的地貌分析法。上述课题构成了河流演变学的框架,亦为更深入地分析处理河流演变过程打下了基础。本篇所述地貌学原理将在本书后面篇幅用工程方法加以扩展。

河道的形成及其对变化的反应是水流和边界间复杂的相互作用的直接结果,这类河流演变的物理和解析基础在第二篇中介绍。其主要内容包括明渠水力学,泥沙物理特性,冲刷标准及与冲刷有关的问题,冲积河床阻力,泥沙输移、弯道水流及其输沙过程。这些内容为深入广泛地研究河流提供了基础,同时也是泥沙标准教科书的典型内容。本书既编入了上述课题的最新成果,亦编入了泥沙著作中一般不介绍的弯道水流。第二篇所介绍的知识是该书后面各篇的分析基础;这些知识本身对工程分析亦是有价值的。

第三篇介绍准衡河流及其演变。本书在叙述许多重要经验方法的同时,重点放在确定在动力平衡条件下冲积河流的水力几何基本参数和定量描述河道形态及平衡调整的演变过程的分析方法。在本篇中首先概述河道形态的基本物理关系,然后应用这些关系建立冲积渠道稳定设计的方法和确定天然河道水力几何形态。最后,对河道的重要特征,如渠道几何参数,河弯,河型和区分不同特性河道的临界条件等进行了全面的分析。其独到之处是定量确定渠道对变化的反应,并用实例予以说明。

第三篇还包括弯道平面形态和蠕动过程。刻划弯曲河道水流特性的是螺旋流或横向环流的沿程变化规律,弯道的许多特性均与它有关。自动调节形成的弯道平面形态的解析确定也建立在横向环流的沿程变化规律的基础上。

第四篇讲述冲积河道数学模型。该篇用算例来描述和说明模拟方法及其应用。采用准二维模型模拟具有活动边界的河渠冲淤过程。用这种模拟方法可获得河床冲淤(刷深和堆积),宽度变化和由河弯引起的河床形态变化。河道冲积-反馈数学模拟的物理基础的特点是在满足物理约束的条件下,水流通过不断的调整以趋于动力平衡。即使因流量的不断变化动力平衡不太可能达到,但是,作为对自然或人为变化的反应,冲积河流的瞬态变化仍反映出河流向动力平衡方向的调整。

数学模型包括水流计算、泥沙计算和河床变形模拟等主要部分。详细叙述了每一部分的物理基础及其模拟方法。

本篇还通过计算机辅助法阐明了可冲渠道的许多瞬变问题:如桥渡局部冲刷问题,

渐溃形态,采集沙石造成的冲刷问题,河道三角洲的潮汐反应,弯道水沙规律和河岸护坡设计。书中还给出了几例数学模型的野外实测资料检验情况。

第五篇讲述河流工程。主要叙述河道整治的工程措施,包括护岸、堤防和分级控制建筑等等。每一措施都用实例予以说明。

本书特色

本书是最早从工程观点指出河流地貌及其环境和人为变化的反应的完整的解析处理方法的专著之一。关于河道准衡宽度的确定及宽度不断调整的解析方法亦是最新的研究进展。书中总结了河道冲积过程所遵循的基本原则。

冲积河流的计算机模拟及其应用是本书的主题之一,亦是这一领域最新研究进展的核心。本书从坚实的物理基础出发,用数学的方法把复杂的物理关系综合到一个模型来模拟河道变形。书中用大量的实例说明河流工程的计算机辅助分析设计。这一方法特别适宜于那些天然几何形态不能用传统方法计算的河道。

除工程应用外,数学模型同样对用计算机来解释物理现象和验证假设的研究人员有价值。我的研究曾大大受益于在计算机上进行的无数次试验。

本书对弯道的水沙规律进行了大量的探讨。除把弯道形态(如弯曲平面形态和床面形态)和水力学联系起来外,还和弯道横向环流联系起来研究。

本书的许多内容都与工程设计有关。许多章节都有与工程设计有关的内容,从传统的设计方法到计算机辅助渠道设计方法。

预测河渠对自然变迁和人类活动所引起的变化的反应,是河道工程和环境研究的重要课题。用定量的方法预测河道长系列的准衡调整和洪水过程的短期变化,是本书的独到之处。

现有的泥沙输移著作一般包括了冲积河流阻力和泥沙输移的基本课题。本书收编了这一领域的最新进展,因此代表了这一领域的当今水平。本书亦包括目前发展的不平衡输沙的泥沙扩散和分选等课题。

张海燕
加利福尼亚圣迭戈
1987年10月

目 录

译序.....	i
中文版序言.....	iii
英文版序言.....	v
第一篇 河流地貌学	1
第一章 绪论.....	3
第一节 水系.....	3
第二节 与冲积河流有关的变量.....	4
第二章 河流形态学概述.....	6
第一节 准衡概念.....	6
第二节 造床流量.....	6
第三节 河流纵剖面.....	7
第四节 河型分类.....	8
第五节 河流形态中的临界值.....	15
第六节 水力几何形态.....	16
第七节 河道的平面形态.....	19
第八节 河流反应的地貌分析.....	21
第一篇参考文献.....	24
第二篇 河流演变基础	27
第三章 河流水力学.....	29
第一节 切应力分布.....	29
第二节 均匀流公式.....	30
第三节 边界层区.....	31
第四节 河渠紊动剪切流.....	33
第五节 定床水流阻力.....	35
第六节 卵石河床的水流阻力.....	38
第七节 组合糙率及边壁校正.....	39
第八节 能量方程及水面线.....	42
第九节 明渠非恒定流.....	43
参考文献.....	49
第四章 泥沙的物理特性.....	51
第一节 泥沙颗粒的大小.....	51
第二节 泥沙颗粒的形状系数.....	53
第三节 沉降速度.....	53
第四节 泥沙的休止角.....	56
参考文献.....	57
第五章 冲刷标准和与冲刷有关的问题.....	59

第一节	临界切力	59
第二节	Shields 图	60
第三节	以切力为基础的其他冲刷标准	62
第四节	边坡上的临界切力	63
第五节	允许流速	65
第六节	梯形河道边界切力的分布	67
第七节	弯道边界切力	68
第八节	稳定不冲渠道的设计	69
第九节	桥墩周围的局部冲刷	71
第十节	堤坝附近的局部冲刷	74
	参考文献	75
第六章 冲积河流床面形态和水流阻力		77
第一节	床面形态	77
第二节	床面形态的判定	81
第三节	床面形态尺度	84
第四节	水温影响	86
第五节	冲积河道水位-流量关系的确定	87
	参考文献	94
第七章 河流泥沙运动		97
第一节	推移质公式	98
第二节	紊流扩散及扩散方程	105
第三节	悬移质输沙率	107
第四节	床沙质输沙率公式	113
第五节	对各公式的评价	119
第六节	水温的影响	120
第七节	悬移质对水流特性的影响	122
第八节	非均匀流中的泥沙输移	125
第九节	泥沙的分选	127
第十节	河流泥沙的采样	131
	参考文献	134
第八章 弯曲河道中的水流		137
第一节	基本方程	137
第二节	充分发展流动的横向流速分布	139
第三节	边界切应力	142
第四节	横向床面比降和粒径分布	143
第五节	横向推移质输移	147
第六节	弯曲明渠的能耗	148
第七节	螺旋运动沿流向的变化	151
第八节	弯道水流计算	153
第九节	河弯中的横向流动与横贯水流	156
	参考文献	158
第三篇 淮衡河流及其演变		161

第九章 水力几何形态的理论基础	163
第一节 有关的物理关系	163
第二节 与稳定宽度有关的物理关系	164
第十章 稳定冲积渠道设计	167
第一节 稳定冲积渠道设计的河相法	169
第二节 稳定冲积渠道设计的合理化法	173
第三节 渠系中稳定冲积渠道的设计	178
第四节 渠道老化过程	181
第五节 卵石河道水力几何形态	181
第十一章 河流形态分析	186
第一节 河流弯曲的分析	187
第二节 河流形态和临界条件的功率研究方法	193
第三节 河道几何形态、河型和临界条件	197
第四节 河床变形：平衡的调整	202
第五节 交错边滩的形成	208
第十二章 河弯的平面形态和形成过程	215
第一节 正弦派生曲线	215
第二节 以螺旋运动的沿程变化为基础的河弯流路	216
第三节 控制河弯蠕动的过程	223
第四节 河曲成因	225
第三篇参考文献	228
第四篇 河流演变的模拟	233
第十三章 动床河道的数学模型	235
第一节 河流演变的物理基础	235
第二节 冲淤过程中河宽的调整	236
第三节 FLUVIAL 模型概要	238
第四节 水流计算	239
第五节 泥沙计算	241
第六节 河宽变化的模拟	243
第七节 河床剖面变形的模拟	244
第八节 弯曲型河流的河床变形模拟	245
第九节 数学模型的检验和率定	246
第十四章 冲积河流的计算机辅助研究	247
第一节 桥渡的普遍冲刷	247
第二节 渐变形态	254
第三节 沙石采集引起的河床变形	259
第四节 河流和三角洲系统的潮汐反应	263
第五节 弯曲河道的水沙演算	270
第六节 河流护岸设计	274
第七节 河流泥沙的演算	278
第四篇参考文献	283
第五篇 河流工程	285

第十五章 河道整治	287
第一节 护岸工程	288
第二节 堤	295
第三节 稳定控制结构	297
第五篇参考文献	299
附录 I 汉英地名对照表	300
附录 II 公英制计量单位换算表	302
附录 III 常用数表	303

第一篇 河流地貌学

第一卷 第一冊

第一章 绪 论

河工学是以人类福利为目的的对河流控制和利用的科学。从广义上说,它包括治河、渠道设计、防洪、通航、水工结构设计、减轻灾害和环境改善。由于重点常着眼于自然变动及诸如筑坝、渠化、引水、建桥及沙石开采等人为控制利用引起的河流本身长期及短期的反应,使河工学与土木工程的其他方面有所区别。对河流反应的评估及对工程的初设、规划及设计等阶段均极重要,应将河工学和泥沙工程学的基本原理用于分析每项河流工程的具体情况。尽管河工学的领域限于河道,其时间尺度亦仅考虑工程要求,但河性则受作为整体的水系的影响,从而涉及地质的时间尺度。因此,河工学必须以对水系和地貌概念正确的理解作为依据。

第一节 水 系

河流属于水系范畴,同时,水系还包括流域及下游水库、湖泊或海洋。Schumm(1977)将水系分为三部分,如图 1.1 所示:上部,即区域 1,为河源区。这是大部分水沙的发源地。在此区域内,小的河流具有不稳定的分叉河道的特点。由于具有这种不稳定的河型,河流形态方面的研究只能是总体性的而不着眼于细节。中部,即区域 2,是河道最稳定并且形态最确定的部分。大型河流的区域 2 可很长,但小的河流则可能没有这一区域。对这部分河段,进行了广泛的研究、模拟和控制。尽管作为一种动态系统,这一区段的河道相对较稳定,但有时仍发生迅速且明显的变化。

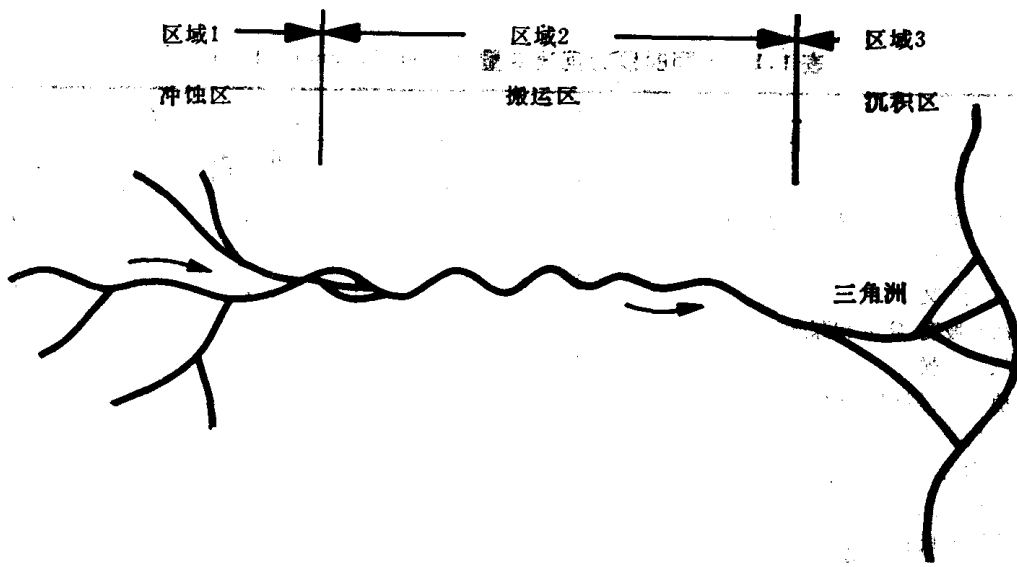


图 1.1 水系(选自 Schumm, 1977)

区域 3 接近河口。本区河道亦受到潮汐或基准面变化的影响。由于三角洲的持续发展,需增大坡度(淤高)以保持河道底坡及输移力。在此区内,河道常呈分汉型。

第三节 与冲积河流有关的变量

河道水流因具有自由表面而称为明渠水流。边界固定的明渠只有一个自由面。但一个自身几何形态发展不受限制的冲积河流的所有边界都是自由面。冲积河流自身所塑造的几何形态包括许多变量,这使得河流形态学及河流动力学成为吸引众多工程师和科学家注意的复杂学科。作为深入了解河道形成及其变迁的第一步,需确定各种变量及它们在河流演变过程中的相互关系。

与冲积河流有关的变量分为独立变量和相关变量,即起因和结果。由任何来源加诸河流的因素为独立变量或控制变量,其产生的效果则为相关变量 (Kennedy and Brooks, 1963)。河流不能决定独立变量而是被独立变量所决定。目前所讨论的变量包括河流的特性、泥沙性质及水系特性。水系特性包括流量(Q)、输沙率(Q_s)、河宽(B)、水深(D)、平均流速(U)、水力半径(R)、河道底坡(S)以及摩擦系数(F)。

Langbein (见 Leopold, Wolman, and Miller, 1964), Kennedy 和 Brooks (1963), Leopold 等(1964) 以及 Schumm(1971) 总结了在准平衡情况下,明渠系统中独立变量及相关变量的选择问题。水槽实验和现场情况是有区别的。因对前者而言,某些变量可按实验者的意图加以控制。凡这样选取的变量就是独立变量。对于非潮汐河流,必须从长期和短期的观点加以区别。Schumm(1971) 把时间尺度区分为三种:稳定时段、准衡时段和地质时段。稳定时段可能以天数来量度,准衡时段在百年这个数量级,而地质时段可能达数百万年。时段长度亦应随流域的大小而异。时段的绝对长度并不重要,重要的是这样一个概念:因时间尺度的不同,一个变量可以是起因,也可以是结果。

河流变量及其在指定时段条件下是独立抑或相关变量的状态归纳于表 1.1 中。在短期或稳定时段范围内,输沙率可作为流速的函数而当成一个相关变量。这样一种函数关系

表 1.1 不同时期的河流变量 (根据 Schumm, 1971)

变 量	变 量 状 况		
	稳 定 (短期)	准 衡 (长期)	地 质 (超长期)
地质学方面 (岩性学, 结构)	I	I	I
古 气 候	I	I	I
古 水 文	I	I	D
河谷坡度、宽度和深度	I	I	D
气 候	I	I	X
植被(类型和密度)	I	I	X
平均流量	I	I	X
平均输沙率	I	I	X
河槽形态	I	D	X
实际流量和沙量	D	X	X
水流的水力学特性	D	X	X

注: I, 独立变量; D, 相关变量; X, 不确定。