



FLUVIAL
PROCESSES

河流演变学

[加] M. Selim Yalin, A.M. Ferreira da Silva

戴文鸿 唐洪武 闫静 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



FLUVIAL PROCESSES

河流演变学

[加] M. Selim Yalin , A.M. Ferreira da Silva

戴文鸿 唐洪武 闫静 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系 M.S. Yalin 教授与 A.M.F. da Silva 教授 2001 年的出版专著 *Fluvial Processes* (IAHR, 2001) 的中文译本。译时在不损害原义表达的基础上, 尽可能保持原著风格。本书采用与原著相同的编排方式, 共分 6 章: 第 1 章介绍相关的基础知识; 第 2 章介绍床面形态与水流阻力的相关理论; 第 3 章阐述稳定河道及其计算; 第 4 章阐述稳定河道的形成, 弯曲河道与分汊河道的演变过程, 并涉及三角洲的形成过程; 第 5 章阐述弯曲河道的几何及力学特性; 第 6 章阐述弯曲河道的相关计算。

本书可作为水利、环境等涉河专业高校研究生的教材, 亦可作为相关研究人员或工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

河流演变学 / (加) 雅林, (加) 席尔瓦著; 戴文鸿, 唐洪武, 闫静译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 6

书名原文: *Fluvial Processes*
ISBN 978-7-5170-3336-3

I. ①河… II. ①雅… ②席… ③戴… ④唐… ⑤闫… III. ①河道演变 IV. ①TV147

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第136633号

书 名	河流演变学
原 书 名	<i>Fluvial Processes</i>
原 著 者	[加] M. Selim Yalin, A.M. Ferreira da Silva
译 者	戴文鸿 唐洪武 闫静
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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12.25印张 234千字
版 次	2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷
印 数	001—600册
定 价	49.00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

译者序

《河流演变学》(原著: Fluvial Processes) 是国际知名水力学及河流动力学学者 M. Selim Yalin 教授与 A.M. Ferreira da Silva 教授合作研究的成果。原著第一作者 Yalin 教授, 生前是加拿大皇后大学 (Queen's University) 终身教授, 曾任国际水利与环境工程学会 (The International Association of Hydro-Environment Engineering and Research, 简称 IAHR) 河流水力学委员会 (The Committee on Fluvial Hydraulics) 主席 (1986—1991 年), 其研究涉及泥沙输移理论、河流动力学、河流演变学和水流数学模型等领域。Yalin 教授一生学术成果丰硕, 除发表了数百篇学术论文外, 还出版了包括 Hydraulic Models (1971)、Mechanics of Sediment Transport (1972)、River Mechanics (1992) 以及 Fluvial Processes (2001) 在内的多部学术专著。原著另一作者 da Silva 教授, 现为加拿大皇后大学教授, 其研究涵盖河流紊动力学、泥沙输移理论与河流地貌动力学等领域。

第一译者戴文鸿教授曾师从 Yalin 教授和 da Silva 教授, 研习数载, 得益匪浅, 其翻译出版导师研究专著的心愿由来已久。现《河流演变学》得以面世, 以飨中国读者。

《河流演变学》理论缜密, 条理清晰, 注重阐述物理概念, 擅长解读公式含义, 关注业界研究动态, 强调实验勘测佐证, 广泛引荐同行成果。将大尺度紊动涡旋与大尺度床面形态有机结合、深入研究, 无疑是本书最大亮点; 广泛运用量纲分析则是本书最大特色。全书共分 6 章: 第 1 章介绍基础知识; 第 2 章阐述床面形态与水流阻力; 第 3 章介绍稳定河道及其计算; 第 4 章阐述稳定河道的形成, 弯曲河道与分汊河道的演变过程; 第 5、第 6 两章则分析和阐述弯曲河道的几何及力学特性和相关计算, 意在更深入地研究河流演变。

本书可以拓宽河流演变研究者的视野，不仅可作为河流领域相关研究人员和工程技术人员的参考用书，还可作为地理、水利和环境等涉河专业高校师生的教学用书。对于有兴趣于河流演变学的读者，本书亦是难得的佳作。

本书出版承蒙中国水利科技专著译著出版基金、国家自然科学基金（51479071、51239003 和 51109066）、江苏省自然科学基金（BK2012808）、江苏高校优势学科发展平台（YS11001）以及“111”引智计划（B12032）等的资助和支持。河海大学毛野教授及泥沙实验室全体同仁为本书定稿等提出了诸多宝贵的修改意见，河海大学水力学及河流动力学专业研究生张海通、苗伟波、闫志方、赵苏磊、丁伟、张云、高嵩、冯逸君、甘珑、刘震、余雯、嵇敏、张九鼎等也参与了本书译稿的整理工作，在此一并致以衷心的感谢。

《河流演变学》内容博大精深，译者才疏学浅，书中难免有纰缪、疏漏或对原著领悟不深而曲解原意之处，凡此种种敬请读者批评指正。

戴文鸿 唐洪武 闫静

于江苏省南京市

2015年4月

原 著 前 言

冲积河道中行进的水流常常改变其河床表面的形态，从而形成沙纹、沙垄和浅滩等；而且，在诸多情况下，水流都是在整体上改变整个河道，从而使河道在平面上展现出弯曲或分汊态势。总体来讲，冲积河流及其可变形的边界经历着形式多样的河流演变过程，并演绎着不同的冲积形态。

本书定性和定量地描述河流的演变过程及相关的冲积形态。除面向水利工程、水资源及相关地球科学分支等领域的研究者和研究生外，本书也可作为工程技术人员的参考用书。

本书中心思想如下：冲积河道中（沿水流方向）周期性变化的大尺度冲积形态是由水流的大尺度紊动引起的，而此后冲积形态随时间的演变过程则是由河道的稳定趋势引导的。

本书内容具有演绎特征，即每一章节的内容均以前面章节的内容为前提；因此，倘若不按照顺序阅读，读者或许会感到难以理解。书中大量运用了量纲分析法（Dimensional Method），并且强调了“与实验相符”的重要性。由于稳定分析法（Stability Approach）并非为作者的研究领域，故本书没有采用稳定分析法。（如果读者对采用稳定分析法研究河流演变的相关内容感兴趣，可参阅 G. Seminara, G. Parker, M. Tubino 和 T. Hayashi 的著作）。

第一作者 M. Selim Yalin 欣闻其之前出版的几部著作被若干大学选作相关研究生课程的教材。基于这一情况，本书在编写时主要考虑以学生为阅读群体。为此，每一章后均附有与该章内容紧密相关的习题；此外，凡适当之处，也均提供了有关后续研究的建议。关于阻力系数和稳定河道计算的 FORTRAN 程序也包含于书内^①。

① 因版权问题，本中文译本并未提供这些程序。

通常，为了便于编程计算，需要对实验数据散点进行拟合，因此，书中提出了诸多“拟合计算公式”。这些公式并没有特别的物理含义，它们仅仅是为表达实验散点的分布趋势而已。

本书共分6章。第1章介绍紊流和泥沙运动的基本原理；第2章讨论床面形态及水流阻力。这两章只是对《河流动力学》(River Mechanics, M. Selim Yalin, Pergamon Press, 1992)中相关内容的更新和修订。第3章阐述河道稳定的概念及其热力学公式。稳定趋势影响下弯曲河道和分汊河道的演变规律在第4章中进行讨论，同时，三角洲的形成过程亦有所涉及。目前，河流动力学的研究内容大多与弯曲河道有关，为此，第5章专门研究弯曲河道的几何及力学特性。弯曲河道的水流运动、河床变形以及河岸迁移—扩展各方面的计算则是第6章的主要内容。

作者感谢 H. Scheuerlein 教授 (IAHR 第三学术分会主席) 长期以来的热心帮助和鼓励；并对 G. Di Silvio 教授和 M. Jaeggi 教授审阅本书手稿的工作表示感激，他们为本书定稿提出了许多有价值的建议。然而，书中若有任何不妥之处，均系作者职责所失。

作者感谢加拿大皇后大学应用科学学院院长 T.J. Harris 博士和土木工程系主任 D. Turcke 博士为本书出版提供的资金支持；此外，感谢皇后大学图形设计组的 Larry Harris 先生提供的技术支持。

M. Selim Yalin 和 A.M. Ferreira da Silva

于安大略省金斯敦市

2000年8月

符号列表及说明

1. 一般符号

f_A	确定参量 A 的量纲函数
$\Phi_A, \phi_A, \Psi_A, \psi_A$	确定参量 A 的无量纲函数
$\alpha, \alpha', \beta, \beta'$	参量表达式中的无量纲系数（不一定为常数）
\approx	近似地等于，可与相比的
\sim	和……成比例（比例系数可能不是一个常数）
∇	Nabla 算子（“Del”）
const	常量

2. 平均值

\bar{A}	参量 A 的垂向平均值
A_m	参量 A 的断面平均值
A_{av}	参量 A 的河域平均值

（详见 5.4 节中关于平均值定义的说明）

3. 下标

a, O	分别表示弯道水流中的参量在顶点和拐点断面处的数值
b	表示在河床上或者与河床相关的参量的数值
cr	表示相应于泥沙起动的数值（相应于“临界状态”）
max	表示参量的最大值
min	表示参量的最小值
R	表示参量的稳定状态值
0	通常表示 $t=0$ 时刻参量的数值；除了 τ_0, c_{M0} 和 θ_0

4. 坐标

t	时间
x	顺直水流的方向；弯道水流的大致方向
y	水平面内垂直于 x 的方向

z	通常指垂直于 $x-y$ 平面的方向 (也可表示某点的高程——见“5. 相关量”)
l	弯道水流的纵向坐标
l_c	弯道水流沿中心线的纵向坐标
r	弯道水流的径向坐标; 在河道曲率中心处, $r=0$
n	弯道水流的径向坐标; 在河道中心线上, $n=0$
n_s	水平面内垂直于流线 s 的方向; 径向自然坐标
s	流线; 纵向自然坐标
ϕ	极坐标中的角度
ξ_c	l_c 的无量纲值 ($\xi_c = l_c/L$)
η	n 的无量纲值 ($\eta = n/B$)
ζ	z 的无量纲值 ($\zeta = z/h_{av}$)

5. 相关量

a_1, a_2	连续相邻的顶点断面 (第 3 章)
a_i, a_{i+1}	连续相邻的顶点断面 (第 5 章和第 6 章)
A	与水流能量相关的特征值 (在稳定河道演变过程中趋于最小化)
B	自由水面的宽度
B_c	河道断面中心区域的宽度
B_s	粗糙度函数
c	总无量纲 (Chézy) 阻力系数
c_f	c 中纯摩擦引起的阻力分量
c_Δ	c 中床面形态引起的阻力分量
c_M	弯道水流总的当地无量纲阻力系数
c_{M0}	c_M 中河床引起的当地阻力分量 (包括床面形态的影响)
C	悬移质的当地无量纲体积浓度
C_ϵ	当 $z=\epsilon$ 时, C 的数值
CV	控制体积
D	颗粒材料的代表粒径 (通常为 D_{50})
e_i	空间点 m 处单位质量流体的内能
e_k	空间点 m 处单位质量流体的动能
e_p	空间点 m 处单位质量流体的压能
e	空间点 m 处单位质量流体的总能量 ($e=e_i+e_k+e_p$)
E_i	系统或控制体积中流体的内能

E	系统或控制体积中流体的总能量
e_V, e_H	分别为垂向和水平向紊动猝发形成的涡旋
E_V, E_H	分别为垂向和水平向大尺度紊动的涡旋 (当 $t = T_V$ 时, $E_V = e_V$; 当 $t = T_H$ 时, $E_H = e_H$)
F_i	单位时间内通过横断面面积 A_i 的能量转化 (能量通量与位移功率之和)
g	重力加速度
h	水深
i_α	α 方向上的单位矢量
J	纵向自由水面的比降
\mathcal{J}	径向自由水面的比降
$J_0(\theta_0)$	关于 θ_0 的 0 阶第一类 Bessel 函数
k_s	河床表面的沙粒粗糙度
K_s	河床的总有效粗糙度: 沙粒粗糙度与床面形态粗糙度之和
L	弯曲长度 (沿 l_c 测量的长度)
L_V, L_H	分别为垂向和水平向上的猝发长度
n	猝发 (水平紊动) 的排数
O_1, O_2	连续相邻的拐点断面 (第 3 章)
O_i, O_{i+1}	连续相邻的拐点断面 (第 5 章和第 6 章)
p	颗粒材料的孔隙率
Q	流量
Q_{bf}	平滩流量
Q_s	体积输沙率 (通过水流的整个横断面)
\dot{Q}_s	系统或控制体积与周围环境之间的净热交换率
q	单宽流量 ($q = Q/B$)
q_{sb}	推移质的单宽体积输沙率 (在区域 $0 < y < \epsilon$ 中)
q_{ss}	悬移质的单宽体积输沙率 (在区域 $\epsilon < y < h$ 中)
q_s	总单宽体积输沙率 $q_s = q_{sb} + q_{ss}$
R	弯道水流中心线的曲率半径
\mathcal{R}	水力半径
r_s	流线 s 的曲率半径
S	河床坡降
S_c	沿弯道水流中心线的河床坡降
S_v	河谷坡降
s	熵

S	系统或控制体积的熵
S_{ys}	流体系统（与控制体积 CV 相对应）
T	当地“侧向应力和床面剪切应力”的合成矢量
T°	绝对温度（Kelvin 温度）
T_b	弯曲河道河床的演变历时
\hat{T}_0	河宽的演变历时
T_i	河流或其可动边界特征参数 i 的演变历时
T_V, T_H	分别为垂向和水平向猝发历时
T_R	稳定河道的演变历时
T_Δ	床面形态的演变历时
$(T_\Delta)_i$	床面形态 i 的演变历时（当 $i=a$ 时，为交错浅滩；当 $i=d$ 时，为沙垄；当 $i=r$ 时，为沙纹；等等）
U	当地流速矢量
U	矢量 U 的大小
U_b	床面上的流速矢量
u, v, w	分别为 U 在纵向、横向和垂向上的投影（标量）
v_*	摩阻流速 $v_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$
v_Γ	横向环流的流速大小
W	水流边界面的当地移动速度（垂直于该表面的方向）
W'_1, W'_2	分别为弯道内岸 1 和外岸 2 的当地径向移动速度（水平面上）
W'	中心线的当地径向移动速度
W'_a	顶点断面处的 W' 值
W_x	弯曲河道的迁移速度（沿 x 方向）
W_x, W_l	分别为沿 x 和 l 方向上沙波的迁移速度
\dot{W}	系统或控制体积与周围环境之间的净功率
w_s	颗粒的沉降速度
z	某点的高程（通常也指竖直方向——见“4. 坐标”）
z_b	任意 t 时刻的河床高程
$(z_b)_0$	$t=0$ 时刻的河床高程
$(z_b)_T$	$t=T_b$ 时刻的河床高程
z_c	质心的高程
z_f	任意 t 时刻自由水面的高程
z'	t 时刻 z_b 的正或负增量 [$z' = z_b - (z_b)_0$]
z'_T	T_b 时刻 z_b 的正或负增量 [$z'_T = (z_b)_T - (z_b)_0$]

γ	流体的容重
γ_s	颗粒在流体中的容重 (湿容重)
Γ	横向环流
Δ, Λ, δ	通常, 分别指床面形态的高度、长度和陡度
$\Delta_i, \Lambda_i, \delta_i$	对应于床面形态 i 的高度、长度和陡度 (当 $i=a$ 时, 指交错浅滩; 当 $i=d$ 时, 指沙垄; 当 $i=n$ 时, 指 n 排浅滩; 当 $i=r$ 时, 指沙纹)
ϵ	推移质区域的厚度
θ	弯曲河道在 l_c 断面处的偏转角
θ_0	$l_c = 0$ 断面处的偏转角
Θ	河道演变的无量纲时间 (或阶段) 变量
κ	von Karman 常数 (≈ 0.4)
λ_c	阻力系数 c 与纯摩擦系数 c_f 的比值 ($\lambda_c = c/c_f$)
Λ_M	弯段的波长
ν	运动黏滞系数
ν_t	涡旋运动黏滞系数
ρ	流体密度
ρ_s	颗粒密度
σ	河道的弯曲系数 ($\sigma = L/\Lambda_M$)
τ_0	床面剪切应力矢量 $\vec{\tau}_0$ 的大小
χ	当地“侧应力”合成矢量 $\vec{\chi}$ 的大小
ϕ_r	休止角
ω	偏移角 (弯曲河道中流线 s 与坐标线 l 之间的夹角)
ω_c	沿弯道水流中心线处的 ω 值

6. 无量纲组合

Fr	水流弗劳德数 [$Fr = v^2/(gh)$, 式中, v 是某特征流速 ($v = \bar{u}, u_m, u_{av}$ 等)]
Re	水流雷诺数 ($Re = \nu h/\nu$, 式中, ν 是某特征流速)
Re_s	摩阻雷诺数 ($Re_s = v_* k_s/\nu$)
X	沙粒雷诺数 ($X = v_* D/\nu$)
Y	沙粒的可动性数 [$Y = \rho v_*^2/(\gamma_s D)$]
Z	相对水深 ($Z = h/D$)
W	密度比率 ($W = \rho_s/\rho$)
Ξ^3	材料数 [$\Xi^3 = X^2/Y = \gamma_s D^3/(\rho v_*^2)$]

η_*	相对水流强度 ($\eta_* = Y/Y_{cr}$)
ϕ	Einstein 无量纲输沙率 [$\phi = \rho^{1/2} q_s / (\gamma_s^{1/2} D^{3/2})$]
N	无量纲单宽流量 [$N = Q / (BDv_{*cr})$]

说 明

本书中，冲积物指无黏性颗粒材料或介质，冲积河道则指由水流冲积形成的河道或河床。

天然冲积河道通常为“宽浅”河道：它们的宽深比一般大于10。宽深比随流量的增加而增大，某些天然河道，其宽深比甚至达到3位数，这些河道的水流（紊流）几乎均为缓流。

本书河道演变研究采用恒定的（特征）流量 Q （特征流量 Q 的选取总结于3.6节）

目 录

译者序

原著前言

符号列表及说明

第 1 章 基础知识	1
1.1 泥沙输移	1
1.2 紊流	2
1.3 二维二相流	5
1.4 推移质输沙率; Bagnold 公式	8
1.5 推移质输沙率公式的矢量形式	10
1.6 悬移质输沙率	11
1.7 泥沙输移连续方程	13
习题	17
参考文献	19
第 2 章 床面形态与水流阻力	22
2.1 床面形态的成因和定义	22
2.1.1 紊流的猝发现象; 沙垄和浅滩	22
2.1.2 沙纹	27
2.1.3 “均匀流”概念的澄清	28
2.2 垂向紊动引起的床面形态的几何特征和存在区域	29
2.2.1 概述	29
2.2.2 沙垄的几何特征	30
2.2.3 沙纹的几何特征	33
2.2.4 沙纹和沙垄的存在区域	36
2.3 水平向紊动引起的床面形态的几何特征和存在区域	37
2.3.1 交错浅滩的长度	37
2.3.2 复式浅滩; 排列和长度	38
2.3.3 浅滩的存在区域; 浅滩陡度	40
2.4 附加说明	42

2.5	水流流经不平整床面时的阻力系数 c	43
2.5.1	概述	43
2.5.2	阻力系数 c 的计算公式	43
2.5.3	确定阻力系数 c 的其他方法	48
2.5.4	流量 Q 作为确定阻力系数 c 的参量	50
2.5.5	弗劳德数 Fr 和阻力系数 c 的内在联系	51
2.6	水流流经不平整床面时的输沙率 q_s	51
	习题	53
	参考文献	54
	参考文献 A: 沙纹和沙垄数据的来源	58
	参考文献 B: 浅滩数据的来源	60
	参考文献 C: 阻力系数数据的来源	61
第 3 章	稳定河道及其计算	63
3.1	引言	63
3.1.1	稳定河道计算的经验公式	63
3.1.2	极值理论	64
3.2	稳定河道的定义	64
3.2.1	进口连续输沙的稳定河道 R_1	65
3.2.2	进口无输沙的稳定河道 R	66
3.2.3	R_1 和 R 的关系	66
3.3	稳定河道的河宽 B_R 和水深 h_R	67
3.3.1	无量纲形式的基本公式	67
3.3.2	B_R 和 h_R 的表达式	68
3.4	稳定河道的判别标准 A_c	70
3.4.1	基本关系和假设	71
3.4.2	瞬时水流能量结构沿纵向 l_c 的变化	75
3.4.3	水流能量结构随时间 Θ 的变化	77
3.4.4	弗劳德数; 实验对照	81
3.5	稳定河道 R 的计算	84
3.5.1	计算步骤	84
3.5.2	案例: 砾质稳定河道的形成	86
3.5.3	案例: 恒定河宽 B	87
3.6	特征流量	87
	习题	88

参考文献	89
参考文献 A: 稳定河道数据的来源	91
第 4 章 稳定河道的形成; 弯曲河道与分汊河道	93
4.1 弯曲河道及其稳定演变过程	93
4.1.1 河宽 B 与波长 Λ_M 的关系	93
4.1.2 数据所包含的信息	93
4.1.3 $(Fr; \eta_s)$ 和 $(B/h; h/D)$ 坐标平面内弯曲河道的演变过程	96
4.2 分汊河道及其稳定演变过程	101
4.2.1 分汊河道的总体描述	101
4.2.2 底坡的作用	102
4.2.3 $(Fr; \eta_s)$ 和 $(B/h; h/D)$ 坐标平面内分汊河道的演变过程	104
4.2.4 分汊河道的补充说明	107
4.2.5 三角洲的形成	108
4.3 单一河道随时间的演变过程	113
4.4 大尺度床面形态及其稳定演变过程	115
习题	116
参考文献	117
参考文献 A: 弯曲河道和分汊河道数据的来源	118
第 5 章 弯曲河道的几何及力学特性	120
5.1 河道贴体坐标系	120
5.2 正弦派生弯曲河道	121
5.3 横向环流	125
5.4 平均处理方法	128
5.5 弯道水流的对流特性	129
5.6 弯曲河道的阻力系数	134
5.7 结语	136
习题	139
参考文献	140
第 6 章 弯曲河道的相关计算	145
6.1 弯曲河道的垂向平均水流	145
6.1.1 运动方程和连续方程; 阻力系数 c_M 的计算	145
6.1.2 平整床面阻力系数 c_M 的表达式	149
6.1.3 计算成果与室内实验测量成果 (平整床面)	150

6.1.4	封闭弯道水流方程的变分法	154
6.2	弯道水流引起的河床变形	159
6.2.1	河床变形计算	159
6.2.2	河床变形最新研究进展	162
6.3	弯段的迁移和扩展	164
6.3.1	概述	164
6.3.2	法向和径向河岸移动速度	165
6.3.3	径向河岸移动速度的计算	165
6.3.4	径向河岸移动速度的迁移分量和扩展分量	168
6.3.5	弯段的扩展速度与稳定演变	172
	习题	173
	参考文献	175