

泥沙输送 理论与实践

【美】杨志达 著

李文学 姜乃迁 张翠萍 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为美国知名泥沙专家杨志达教授 25 年来在研究、教学、工程咨询方面不懈努力的结晶,反映了他在理论研究、室内试验和野外实践中所获得的成果。本书共 8 章,前 5 章对泥沙运动的基本论题进行了系统的论述,包括:水流与泥沙的特性、各种初始运动公式及作者自创初始运动公式的完整推导、推移质运动与悬移质运动;第 6 章介绍了 9 个著名的全沙公式,详细推导、建立了作者自己的公式并对其应用进行了讨论;第 7 章对各种泥沙运动方程进行了比较和评价;第 8 章讨论了入库泥沙与淤积、水库泥沙分布、下游冲刷、保持库容与恢复库容等水库泥沙的常规议题。

本书包括了大量的例题、练习题,书后还附有计算程序,对从事相关专业理论与工程实践的科技人员以及大专院校相关专业的师生极具参考价值。

SEDIMENT TRANSPORT

Theory and Practice

Copyright ©1996 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

中文版权(2000 年)属中国水利水电出版社所有。版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

泥沙输送:理论与实践/(美)杨志达著;李文学,姜乃迁,张翠萍译. —北京:中国水利水电出版社,2000.3

书名原文:SEDIMENT TRANSPORT: Theory and Practice

ISBN 7-5084-0204-9

I. 泥… II. ①杨…②李…③姜…④张… III. 泥沙运动-研究 IV. TV142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 02930 号

书 名	泥沙输送 理论与实践
作 者	【美】杨志达 著 李文学 姜乃迁 张翠萍 译
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京密云红光印刷厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 360 千字
版 次	2000 年 4 月第一版 2000 年 4 月北京第一次印刷
印 数	0001—1800 册
定 价	56.00 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

作者简介

杨志达于 1962 年在台湾国立成功大学获得学士学位，于 1965 年和 1968 年在科罗拉多州立大学水利工程专业获得硕士和博士学位。作为水利工程师，他曾分别在美国垦务局、美国陆军工程师兵团、伊利诺伊州水调局、伊利诺伊大学水资源中心工作过。作为教授，曾先后在科罗拉多大学丹佛校区、科罗拉多州立大学和明尼苏达大学执教泥沙输送课程并从事科研工作。

杨志达教授是美国土木工程师学会会员，并担任过该学会泥沙专业委员会的主席。他曾在泥沙学、河流动力学、河流地貌学、水力学、水资源工程等领域发表过大量的论文，并获得过美国土木工程师学会、美国地球物理协会、国际水利研究学会、国家注册工程师学会、美国垦务局、美国陆军工程师兵团等组织的嘉奖。

杨志达教授曾受联合国、世界银行、美国 and 国外政府机构的邀请，在众多水资源项目中担任过咨询专家和技术顾问。

原著序：河 流 与 诗

长江三峡的开发将在河流工程中树起一座里程碑，水对人类的重要性再次引起重视。

三峡曾是人类文明的中心，她的美丽赋予诗人以创作灵感，尤其以唐朝为甚。我将有意引用这些摘录，因为像河流（长江）一样，诗（中国）的历史源远流长。

泥沙输送在河流工程中如果不是最重要的议题也是最重要的议题之一。河流工程关心的是大小水体在它排放和汲取的土地上的运行。河流是人类文明的生命线之一，文明往往沿河流兴起。

荆谿白石出，天寒红叶稀。
山路原无雨，空翠湿人衣。

王维（701—761）

在空气—水—空气这个强大的力量系统中，水流是重力最明显的表现形式之一。

君不见黄河之水天上来
奔流到海不复回？

李白（701—762）

在全能的水循环系统中，河流是滴滴细雨和茫茫大海的连接器。河流里的和来自河流的水成为人们饮用和享受的水。

独怜幽草涧边生，
上有黄鹂深树鸣。

韦应物（737—789）

当清澈的水流以巨大的力量在运动时，它本能地会使河床上所具备的沙质物进入水流。清水的底层颜色首先变深，最终整个水体的颜色都变深。早期沉积的泥沙，现在和水流一起运动。

声喧乱石中，
色静深松里。

王维（701—761）

在追求人类幸福的过程中，人们必须谨慎地对河流进行治理。人们必须充

分认识到河流无止境的洪泛欲望，但它也将蜿蜒地流入大海。

山围故国周遭在，
潮打空城寂寞回。

刘禹锡（772—842）

但是，人类必须认识到，对河流的认识永无止境。

道可道也，非恒道也。

老子（公元前 604—515）

所有这些告诉我们，必须研究河流，必须熟悉河流。本书即是朝此方向的努力，作者是长江之子。

沃尔特 H. 格拉夫

原 著 前 言

人类文明和社会经济的发展与最大限度地发挥河流的效益和减小其灾害密切相关。河流通过泥沙输送、冲刷和淤积不断调整其横断面、纵剖面、河道和形态。为了保持沿河经济和文化的可持续发展，了解泥沙输送的基本原理是必要的。应用这些原理可以解决与自然事件和人类活动相关的工程和环境问题。

工程师和河流地貌专家对泥沙输送问题已进行了几百年的研究，并运用不同方法解决工程问题。由不同方法获得的结果往往相差甚远，与野外观测也不相符合。有些基本概念、它们在实际应用上的限制和它们之间的相互联系在近几年才变得清楚。有关泥沙输送的许多复杂问题还有待进一步去认识，它们仍然是未来研究的挑战性课题。

通过多年的研究、教学、工程和咨询工作，我曾研究了与泥沙运动有关的不同类型的问题。有些需要理论分析，有些要依靠经验方法，对很多问题则需要两者的结合。

《泥沙输送：理论与实践》一书由下列 8 章和 4 个附录组成：

- 第一章 水和泥沙的特性
- 第二章 初始运动准则及其应用
- 第三章 水流阻力和床面形态
- 第四章 推移质输送
- 第五章 悬移质输送
- 第六章 全沙输送
- 第七章 输沙函数的比较和评判
- 第八章 水库淤积
- 附录一 符号说明
- 附录二 换算系数
- 附录三 水的物理特性
- 附录四 泥沙输送公式的计算机程序

每章都通过相对独立的材料和例子，来阐述某个泥沙输送的重要因素。每章的材料都与前面各章的材料有关，并为以后章节的理论推导和应用奠定了基础。例如，第一章为后面章节中泥沙输送的计算提供了所需的基本知识；第六章中关于全沙运动的讨论与第四章所讨论的推移质运动和第五章中讨论的悬

移质运动密切相关。

很多关于泥沙输送的教课书所强调的理论主要基于力学的方法，基于能量或功率的方法被广泛忽视。本书对于从功率的方法来研究泥沙输送原理提供了深入的阐述。对基于力学方法的泥沙输送理论，本书也做了系统的分析和比较。

泥沙输送教课书的作者们不愿对不同理论和公式的优缺点进行对比。科研工作者和工程师们经常要面对选择合适的公式来解决工程问题的困境。本书对如何选择公式给出了有用的指南，在解决实际河流工程和环境问题上，运用野外资料的例子为工程师们提供了逐步计算的步骤。

本书努力争取在理论与实践间获取平衡。它主要是为工程系学生而写的一本教课书。建议学习本课程前，已修过微积分、微分方程、明渠水力学和基础流体力学。本书也可作为参考书，帮助科研人员和工程师解决在河流工程、河流地貌学和河流环境科学方面遇到的理论和实际问题。

本书作者和 McGraw-Hill 出版公司对下列审阅者所给出的评述和建议表示感谢。他们是：科莱姆森大学的 Nadim Aziz，佛罗里达大学的 B. A. Cristensen，佛罗里达大西洋大学的 P. D. Scarlatos。

杨志达

目 录

原著序：河流与诗

原著前言

第一章 水和泥沙的特性	1
第一节 引言	1
第二节 术语	1
第三节 水的特性	2
第四节 单颗粒泥沙的特性	2
第五节 泥沙的群体特性	7
习题	11
参考文献	12
第二章 初始运动准则及其应用	13
第一节 引言	13
第二节 一般考虑	13
第三节 剪应力方法	13
第四节 流速法	16
第五节 随机研究	21
第六节 其他初始运动准则	22
第七节 河道冲刷与粗化	23
第八节 渠道稳定设计	28
习题	33
参考文献	34
第三章 水流阻力和床面形态	36
第一节 引言	36
第二节 固定边界对水流的阻力	36
第三节 床面形态	42
第四节 动边界下的水流阻力	47
习题	60
参考文献	61
第四章 推移质输送	63
第一节 引言	63
第二节 剪应力方法	63
第三节 能坡方法	67
第四节 流量法	68
第五节 流速法	69
第六节 床面形态法	69
第七节 概率统计法	70

第八节 随机法	76
第九节 回归分析法	77
第十节 等可移动性方法	84
习题	84
参考文献	85
第五章 悬移质输送	87
第一节 引言	87
第二节 一般考虑	87
第三节 平衡条件下的交换理论	87
第四节 悬移质公式	91
习题	97
参考文献	98
第六章 全沙输送	99
第一节 引言	99
第二节 普通方法	99
第三节 全沙输送函数	99
习题	143
参考文献	144
第七章 输沙函数的比较和评判	146
第一节 引言	146
第二节 对基本假设的评判	146
第三节 分析方法	151
第四节 不同输沙公式精度的直接比较	158
第五节 以计算机模型模拟为基础的间接比较	169
第六节 比较和评判的总结	175
第七节 选择输沙函数的步骤	176
习题	177
参考文献	178
第八章 水库淤积	181
第一节 引言	181
第二节 入库泥沙和淤积	181
第三节 水库淤积分布	195
第四节 下游刷深	205
第五节 保护水库库容	209
第六节 库容的恢复	210
习题	210
参考文献	210
附录一 符号说明	213
附录二 换算系数	218
附录三 水的物理特性	221
附录四 泥沙输送公式的计算机程序	222

第一章 水和泥沙的特性

第一节 引言

泥沙输送是研究水流和沙粒间相互关系的科学。因此，了解水和泥沙的物理特性对研究泥沙输送来说至关重要。本章将介绍一些文献中最常用的术语，并给出水和泥沙的基本特性。描述这些特性的参数常在泥沙输送方程里出现。本章将通过计算方法和例题来演示确定泥沙某些基本特性的步骤。

第二节 术语

本节将定义描述水和泥沙特性的常用术语。

(1) 密度：单位体积的质量。

(2) 容重：单位体积的重量。容重和密度间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-1)$$

式中： γ 为容重； ρ 为密度； g 为重力加速度。

(3) 比重：所给物质的容重与水在 4℃ 或 39.2°F 时的容重之比。泥沙的平均比重为 2.65。

(4) 等容直径：与沙粒具有同样体积的球体的直径。

(5) 筛径：沙粒刚好能够通过的与正方形筛孔边长相等的球体直径。作为近似，筛径与等容直径相等。

(6) 沉降直径：指比重为 2.65 的球体且当在静止蒸馏水中沉降时，与沙粒具有相等最终沉速的球体直径。在水温为 24℃ 时确定的沉降直径为标准沉降直径。

(7) 沉降速度：指单颗沙粒在无限大的静止蒸馏水中沉降时的平均最终沉降速度。在水温为 24℃ 时测定的沉降速度为标准沉降速度。

(8) 休止角：指给定物质在初始滑动条件下形成的坡度角。

(9) 孔隙率：指单位体积的泥沙中所测定的孔隙的体积，即

$$p = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (1-2)$$

式中： p 为孔隙率； V_v 为孔隙的体积； V_t 为泥沙总体积，包括孔隙的体积； V_s 为泥沙体积，不包括孔隙的体积。

(10) 粘滞系数：指在外力作用下流体抗拒流动的程度。动力粘滞系数是剪切力和流速梯度关系式中的比例常数，即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中： τ 为剪切力； μ 为动力粘滞系数； du/dy 为流速梯度。运动粘滞系数为动力粘滞系数与流体密度之比，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

式中： ν 为运动粘滞系数； ρ 为流体密度。

第三节 水的特性

表 1-1 汇总了对泥沙输送研究很重要的水的基本特性。这些特性对温度的变化是敏感的。

表 1-1 水的特性

温度 (°F)	容重 (lb/ft ³)	质量密度 (lb · s ² /ft ⁴)	动力粘滞系数 × 10 ⁻⁵ (lb · s/ft ²)	运动粘滞系数 × 10 ⁻⁵ (ft ² /s)
32	62.42	1.940	3.746	1.931
40	62.43	1.940	3.229	1.664
50	62.41	1.940	2.735	1.410
60	62.37	1.938	2.359	1.217
70	62.30	1.936	2.050	1.059
80	62.22	1.934	1.799	0.930
90	62.11	1.931	1.595	0.826
100	62.00	1.927	1.424	0.739
110	61.86	1.923	1.284	0.667
120	61.71	1.918	1.168	0.609
130	61.55	1.913	1.069	0.558
140	61.38	1.908	0.981	0.514
150	61.20	1.902	0.905	0.476
160	61.00	1.896	0.838	0.442
170	60.80	1.890	0.780	0.413
180	60.58	1.883	0.726	0.385
190	60.36	1.876	0.678	0.362
200	60.12	1.868	0.637	0.341
212	59.83	1.860	0.593	0.319

第四节 单颗粒泥沙的特性

在泥沙输送研究中，单颗粒泥沙重要的特性有粒径、形状、密度、容重和沉速。

一、粒径

粒径是基本的也是最容易测定的泥沙特性。人们已经发现，在许多实际问题中，粒径足以描述沙粒的物理特性。沙粒的大小可用筛析法或透明管累计法确定。表 1-2 所列为美国

标准筛系列的基本数据。莱恩等 (Lane *et al.*, 1947) 建议的泥沙分级尺度 (见表 1-3), 已被广泛用来描述沙粒的大小。

表 1-2 美国标准筛系列

筛 号	孔 径		筛 号	孔 径	
	mm	in.		mm	in.
3-1/2	5.66	0.233	35	0.50	0.0197
4	4.76	0.187	40	0.42	0.0165
5	4.00	0.157	45	0.35	0.0138
6	3.36	0.132	50	0.297	0.0117
7	2.83	0.111	60	0.250	0.0098
8	2.38	0.0937	70	0.210	0.0083
10	2.00	0.0787	80	0.177	0.0070
12	1.68	0.0661	100	0.149	0.0059
14	1.41	0.0555	120	0.125	0.0049
16	1.19	0.0469	140	0.105	0.0041
18	1.00	0.0394	170	0.088	0.0035
20	0.84	0.0331	200	0.074	0.0029
25	0.71	0.0280	230	0.062	0.0024
30	0.59	0.0232			

表 1-3 泥沙分级大小 (Lane *et al.*, 1947)

mm		μm	in.	泰勒标准	美国标准	泥 沙 分 类
4000~2000			160~80			巨型砾石
2000~1000			80~40			大砾石
1000~500			40~20			中砾石
500~250			20~10			小砾石
250~130			10~5			大卵石
130~64			5~2.5			小卵石
64~32			2.5~1.3			极粗砂砾
32~16			1.3~0.6			粗砂砾
16~8			0.6~0.3	0.5~2		中砂砾
8~4			0.3~0.16	5	5	细砂砾
4~2			0.16~0.08	9	10	极细砂砾
2~1	2.00~1.00	2000~1000		16	18	极粗沙
1~1/2	1.00~0.50	1000~500		32	35	粗沙
1/2~1/4	0.50~0.25	500~250		60	60	中沙
1/4~1/8	0.25~0.125	250~125		115	120	细沙
1/8~1/16	0.125~0.062	125~62		250	230	极细沙
1/16~1/32	0.062~0.031	62~31				粗粉沙
1/32~1/64	0.031~0.016	31~16				中粉沙
1/64~1/128	0.016~0.008	16~8				极细粉沙
1/128~1/256	0.008~0.004	8~4				
1/256~1/512	0.004~0.0020	4~2				粗粘土
1/512~1/1024	0.0020~0.0010	2~1				中粘土
1/1024~1/2048	0.0010~0.0005	1~0.5				细粘土
1/2048~1/4096	0.0005~0.00024	0.25~0.24				极细粘土

二、形状

形状是指沙粒的外形，与沙粒的大小和成分无关。科里 (Corey, 见 Schulz 等, 1954) 研究了几个形状要素，并从简单和有效相关的角度总结出形状系数

$$S_p = \frac{c}{(ab)^{\frac{1}{2}}} \quad (1-5)$$

是对形状最有效的表达。式 (1-5) 中的 a 、 b 和 c 分别为穿过沙粒并互相垂直的长、中、短轴。 S_p 为形状系数。对于球体，形状系数为 1.0，自然磨损的石英沙平均形状系数为 0.7。

三、密度

沙粒的密度与其矿物成分相关。通常，比重被用来作为密度的指标，前者被定义为沙粒的容重或密度与水的容重或密度之比。水中携带沙粒主要由石英组成，其比重为 2.65。

四、沉降速度

1. 一般考虑

沙粒在静止水体中获得的沉降速度或最终沉降速度，与沙粒和水在泥沙起扬、输送和淤积条件下的相对水流条件直接相关。沉降速度反映了泥沙大小、形状、表面糙率、比重和流体粘滞性的综合结果。通过沙粒浮重和由流体拖曳力产生的阻力间的平衡，可以计算沙粒的沉降速度。一般的拖曳力方程为

$$F_D = C_D \rho A \frac{\omega^2}{2} \quad (1-6)$$

式中： F_D 为拖曳力； C_D 为拖曳力系数； ρ 为水的密度； A 为沙粒在沉降方向的投影面积； ω 为沉降速度。一个球形沙粒的浮重或淹没重量为

$$W_s = \frac{4}{3} r^3 \pi (\rho_s - \rho) g \quad (1-7)$$

式中： r 为沙粒半径； ρ_s 和 ρ 为泥沙和水的密度。一旦确定了拖曳力系数，可通过式 (1-6) 和式 (1-7) 求解沉降速度。拖曳力系数是雷诺数和形状系数的函数。

2. 对拖曳力系数的理论研究

对于一个在无限大流体中以非常小的雷诺数做缓慢而稳定运动的球体，拖曳力可表达为

$$F_D = 6\mu\pi r\omega \quad (1-8)$$

借助于一剪切力函数并全部忽略惯性项，斯托克斯 (Stokes, 见 Graf, 1971) 求解通用纳维尔-斯托克斯方程而获得式 (1-8)。由此得到的拖曳力系数为

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (1-9)$$

式中： Re 为雷诺数。式 (1-9) 适用于雷诺数小于 1 的情况。

由式 (1-6) 和式 (1-9) 可获得斯托克斯 (1851) 方程，即

$$F_D = 3\pi d\rho\nu\omega \quad (1-10)$$

由式 (1-7) 和式 (1-10)，沙粒的最终沉降速度为

$$\omega = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{\nu} \quad (1-11)$$

式中： d 为泥沙直径； γ_s 和 γ 为泥沙和水的容重。

如果沙粒直径等于或小于 0.1mm，可用式 (1-11) 来估算沙粒在水中的沉速。式 (1-11) 中的运动粘滞系数是水温的函数，可由下式计算

$$\nu = \frac{1.792 \times 10^{-6}}{1.0 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (1-12)$$

式中： T 为水温， $^{\circ}\text{C}$ 。

奥森 (Oseen, 1927) 在求解纳维尔—斯托克斯方程时包括了一些惯性项，由此获得的结果为

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad (1-13)$$

戈德茨坦 (Goldstein, 1929) 提供了一个比奥森近似解更为完整的解，拖曳力系数变为

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1280} Re^2 + \frac{71}{20480} Re^3 + \dots \right) \quad (1-14)$$

式 (1-14) 适用于雷诺数小于 2.0 的情况。格拉夫和阿卡洛格卢 (Graf and Acaroglu, 1966) 汇总了式 (1-13)、(1-14) 表达的和和其他研究者确定的拖曳力系数与雷诺数间的关系 (见图 1-1)。当雷诺数大于 2.0 时，它们之间的关系应由试验确定。

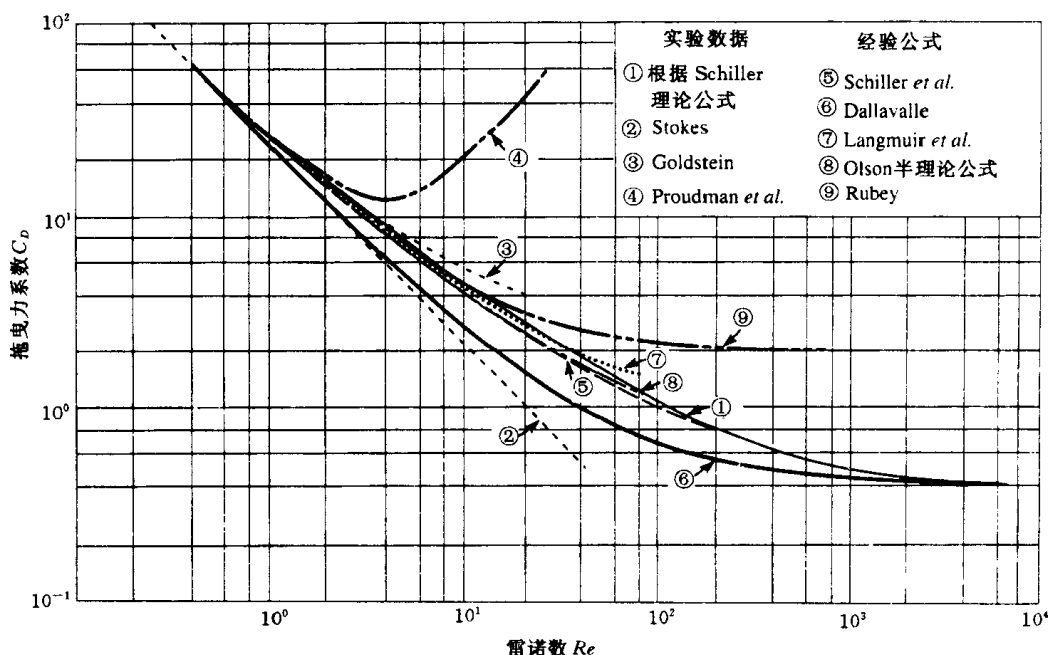


图 1-1 球体拖曳力系数与雷诺数的关系 (Graf and Acaroglu, 1966)

3. 鲁比公式

鲁比 (Rubey, 1933) 介绍了一个计算砂砾、沙和粉沙颗粒沉降速度的公式。对于直径大于 1mm 的石英沙，沉降速度可由下式计算

$$\omega = F \left[dg \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-15)$$

式中： d 为沙粒直径。对直径大于 1mm 的沙粒在水温 10~25℃ 间沉降时，参数 $F=0.79$ 。对直径小于 1mm 的沙粒，则有

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{36\nu^2}{gd^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-16)$$

对大于 2mm 的沙粒，其在水温 16℃ 时的沉速可近似为

$$\omega = 6.01d^{\frac{1}{2}} \quad (\omega \text{ 的单位为 ft/s, } d \text{ 的单位为 ft}) \quad (1-17a)$$

或

$$\omega = 3.32d^{\frac{1}{2}} \quad (\omega \text{ 的单位为 m/s, } d \text{ 的单位为 m}) \quad (1-17b)$$

4. 由试验确定拖曳力系数和沉降速度

当雷诺数大于 2.0 时，无法通过分析确定拖曳力系数，因此，必须通过试验观测沙粒在静水中的沉速来确定拖曳力系数。劳斯 (Rouse, 1937) 汇总了它们之间的关系，如图 1-2 所示。在由图 1-1 或图 1-2 确定了拖曳力系数之后，可通过求解式 (1-6) 和式 (1-7) 计算球形泥沙的沉速。运用图 1-2 中的辅助标度 $W_s/(\rho\nu^2)$ (其中 W_s 为球体沙粒的淹没重量) 可以避免繁琐的计算。对于天然沙，形状系数通常小于 1.0，不能直接应用图 1-1 和图 1-2。当沙粒大小、形状系数和水温已知时，最实际的方法是应用图 1-3。此图由美国水资源联合委员会泥沙专业委员会推荐 (U. S. Interagency Committee on Water Resources, Subcommittee on Sedimentation, 1957)。对于大多数天然沙，形状系数取 0.7。

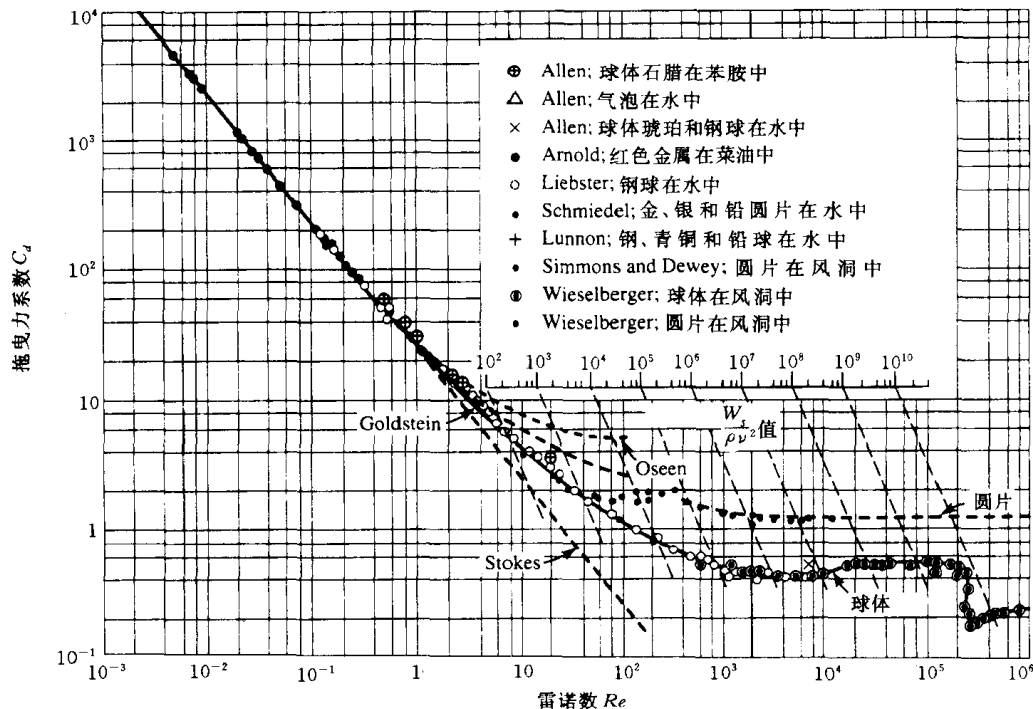


图 1-2 拖曳力系数和雷诺数间的函数关系 (Rouse, 1937)

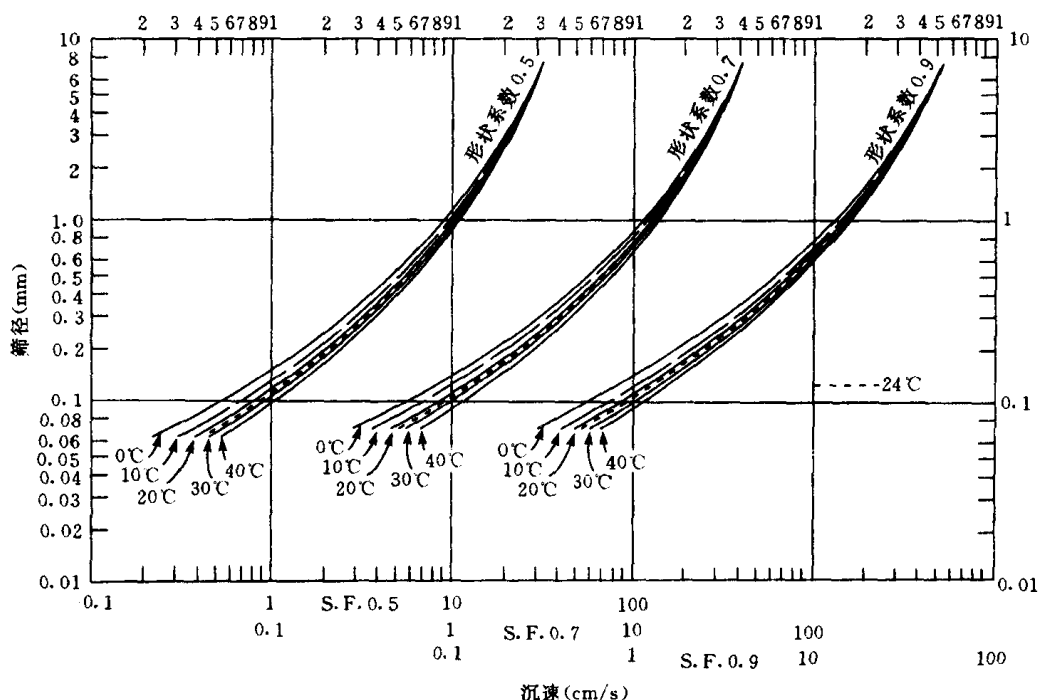


图 1-3 天然石英沙在无穷大的静止蒸馏水中独自沉降时筛径与沉速间的关系
(U. S. Interagency Committee on Water Resources, Subcommittee on Sedimentation, 1957)

5. 影响沉速的因素

可能影响沉速的因素包括：流体和泥沙间的相对密度、流体粘滞性、沙粒表面糙率、沙粒大小和形状、悬移质含沙量和紊动强度。

在前面的讨论中，沉速是指沙粒在无穷大的静止蒸馏水中沉降的速度。在大多数情况下，沙粒并非独自沉降。豪希特等 (Haushild *et al.*, 1961) 的研究表明，增加细沙可以增加粘滞性和水沙混合体的容重。随着分散在水中的细沙含量的增加，沙粒的沉速不断减小。因此，增加细沙可以增大输沙率。

第五节 泥沙的群体特性

在研究泥沙输送时，粒径分布、容重和床沙的孔隙率是三个主要的群体特性。

一、沙粒粒径分布

单颗沙粒的特性和行为是十分重要的，但最令人感兴趣的是泥沙群体。各类泥沙在运动时会有不同的粒径、形状、比重和沉速。通过取样和统计分析确定样品的均值、分布规律和均方差，从而确定泥沙的特性。

通常用统计方法来分析泥沙的粒径和沉速。样品的大小被分成级组，出现在任一级组样品的百分比可点绘成沙粒大小的函数，此图被称为粒径—频率曲线。应用此法对大量样品的检验表明，粒径—频率分布曲线接近于正态概率分布，如图 1-4 (a) 所示。

习惯上将频率柱状图点绘成累积分布图，随着尺寸的增加，在每个级组发生的百分比

被累积起来，形成“小于某粒径的百分比”曲线，如图 1-4 (b) 所示。

由于多数分布趋近于正态概率曲线，如果纵坐标用正态概率坐标代替算术坐标，则累积曲线趋近于一条直线，如图 1-4 (c) 所示。经过如此处理，很容易在图上确定均值和均方差。如果粒径分布是正态的，均值粒径将发生在纵坐标上小于某粒径的沙粒占 50% 的位置；在均值两边的半均方差将分别发生在纵坐标上小于某粒径的沙粒占 15.9% 和 84.1% 的位置。

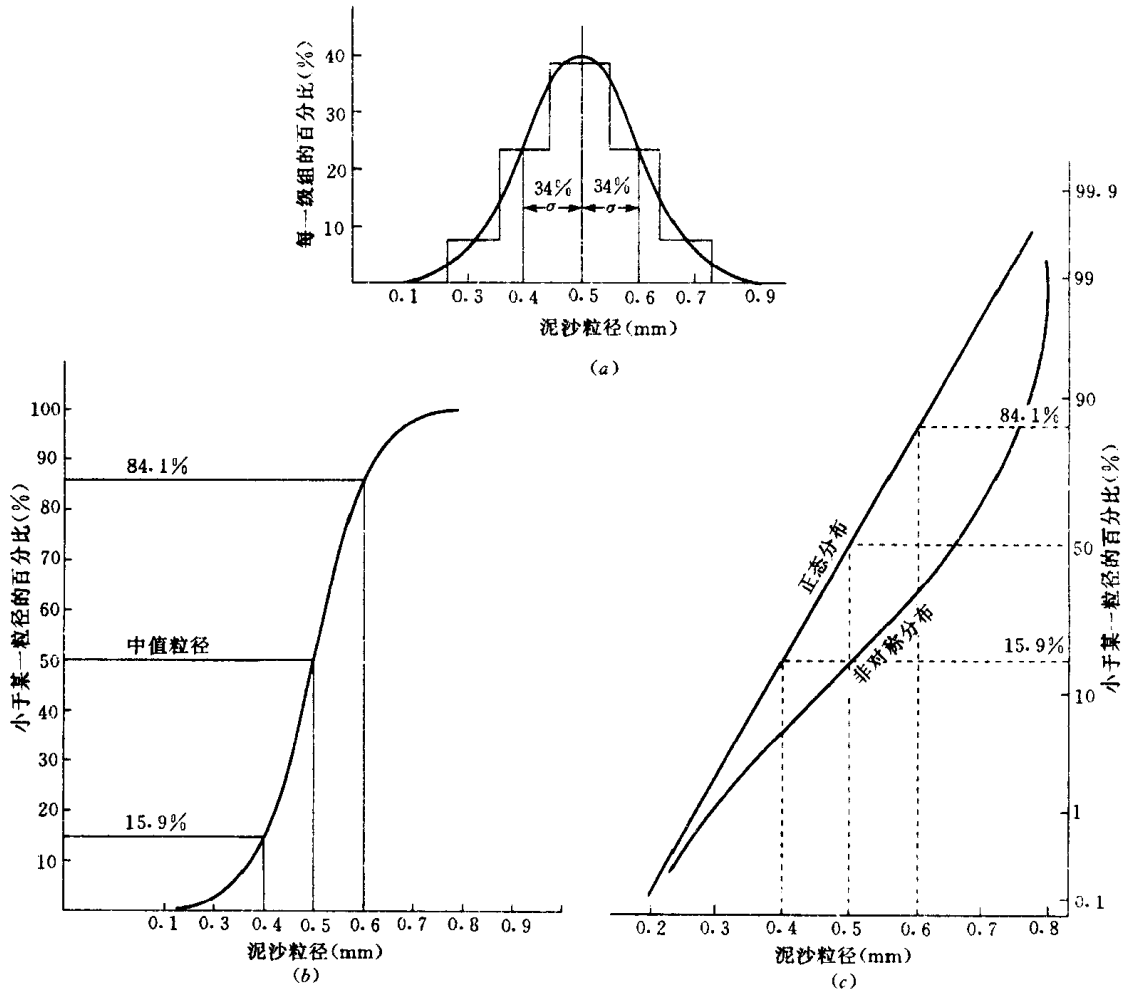


图 1-4

(a) 正态粒径—频率曲线；(b) 正态分布累积频率曲线；(c) 对数纸上的正态和非正态累积频率曲线

如果分布是非对称的，必须通过数据画出曲线，平均粒径将在小于某粒径的沙粒占 15.9% 和 84.1% 的中间，小于某粒径的沙粒占 50% 的粒径为中值粒径。

一般，粒径分布特性可用均值和方差来表达，即

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k X_i f(X_i) \Delta X_i \tag{1-18}$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 f(X_i) \Delta X_i \tag{1-19}$$