

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

河流动力学基础

Fundamental River Mechanics

清华大学 王兴奎 邵学军 李丹勋 合编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

河流动力学基础

Fundamental River Mechanics

清华大学 王兴奎 邵学军 李丹勋 合编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书以固体颗粒在水流中的运动规律为主线,从现象描述、机理分析到实测资料的验证,系统地介绍了河流动力学的基础知识,总结了国内外的研究成果,特别是本学科最新的进展及与其它学科交叉研究的发展趋势。

本书共分七章分别阐述了泥沙颗粒的性质、紊动水流的基本规律、沙波特性和河床阻力及泥沙的起动、推移和悬移规律、泥沙存在对水流结构的影响等。

本书除作为水利工程、港口航道工程、近海工程、环境水利、地质地理及市政工程等专业的研究生教材外,亦可供相关专业的设计、科研和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流动力学基础/王兴奎,邵学军,李丹勋合编. —北京:中国水利水电出版社, 2002

高等学校研究生教材

ISBN 7-5084-1093-9

I. 河… II. ①王…②邵…③李… III. 河流-流体动力学-研究生-教材 IV. TV143

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第034230号

书 名	高等学校研究生教材 河流动力学基础
作 者	清华大学 王兴奎 邵学军 李丹勋 合编
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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×960毫米 16开本 23.75印张 389千字
版 次	2002年10月第一版 2002年10月第一次印刷
印 数	0001—2100册
定 价	38.00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

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook

前 言

《河流动力学基础》是水力学及河流动力学专业的一门专业基础课程,开设该课程的目的是为了让了解有关河流泥沙运动的基础知识。本教材共分七章。在第一章和第二章中,分别介绍了泥沙颗粒和浑水的基本特性及明渠紊流的理论研究和试验量测成果。第三章以水流中颗粒运动特性和床面形态的变化为主要内容,详细介绍了动床床面形态的种类及动床阻力的分析、计算方法。在第四章中总结了泥沙颗粒起动的研究成果,包括了无粘性均匀沙和非均匀沙、粘性沙及轻质沙起动的研究成果。推移质运动和悬移质运动的研究成果分别在第五章和第六章进行了介绍,除均匀推移质的运动规律外,还包括了近来开展的非均匀推移质运动规律的研究,对悬移质运动中的不平衡输沙问题也给出了新近的研究成果。第七章专门介绍了泥沙存在对水流结构的影响,在水流挟带泥沙后的时均速度分布、紊动结构及能量损失所产生的变化方面,均提出了一些新的结果。

参加本书编写人员有:邵学军编写,概述及第一章至第三章;王兴奎编写第四章至第六章;李丹勋编写第七章。全书由王兴奎负责统稿工作,中国水利水电科学研究院胡春宏教授担任主审。

河流动力学是一门较为成熟但仍在继续发展的学科,涉及面较广。在编写过程中除参考已有专著外,还大量引用了近年来的有关研究成果,以求尽可能地联系实际,反映河流泥沙领域的研究现状,帮助学生或科研人员了解学科的进展。对于书中因编者水平所限而存在的疏漏或错误之处,诚恳希望广大读者予以批评指正。

本书第一、第二作者曾分别在钱宁、夏震寰先生的指导下完成了硕士和博士研究生阶段的学习及论文工作。两位前辈脚踏实地的求实精神、严谨的科学态度、一丝不苟的工作作风和为科学献身的精神,始终鞭策着作者不断完善自己的工作。在本书出版之际,特向两位先生致以崇高的敬意。

本教材的编写得到教育部跨世纪优秀人才计划基金的资助。

作 者

清华大学水沙科学教育部重点实验室

2002年4月

目 录

前 言	
概 述	1
第一章 泥沙颗粒的基本性质	10
第一节 风化过程与地表物质组成	10
第二节 泥沙颗粒的个体特性	19
第三节 泥沙颗粒的群体特性	31
第四节 泥沙颗粒的沉速	54
第五节 含沙水体（浑水）的性质	64
第二章 明渠紊流基础	77
第一节 紊流的概念和基本方程	77
第二节 明渠紊流的试验研究	97
第三节 明渠流动中的拟序结构	111
第四节 坡面薄层水流研究	119
第三章 床面形态与水流阻力	132
第一节 床面形态与水流条件和泥沙特性的关系	132
第二节 冲积河流床面形态的判别准则及特性研究	144
第三节 水流阻力和断面平均流速	161
第四节 峡谷或卵砾石床面河道的综合糙率计算	168
第五节 沙粒阻力和沙波阻力	176
第四章 泥沙的起动	195
第一节 泥沙起动的随机性	195
第二节 无粘性均匀沙的起动	206
第三节 无粘性非均匀沙的起动	213
第四节 粘性颗粒和轻质沙的起动	219
第五章 推移质运动	226
第一节 推移质运动的力学和统计分析	226
第二节 均匀推移质的运动规律	230
第三节 非均匀推移质的运动规律	244
第四节 推移质公式的比较和验证	255
第六章 悬移质运动	265

第一节	紊动猝发和泥沙扩散方程	265
第二节	悬移质含沙量的垂线分布	269
第三节	悬移质输沙率	281
第四节	污染物质在水体中的散布	292
第五节	水流挟沙力	297
第七章	泥沙存在对水流结构的影响	305
第一节	泥沙颗粒对时均流速分布的影响	305
第二节	泥沙颗粒对水流紊动结构的影响	320
第三节	泥沙运动对水流能量损失的影响	334
附录 1	习题	342
附录 2	常用符号表	346
参考文献		352

概 述

河流动力学研究的对象是天然冲积河流，研究内容主要有两个方面，一是泥沙在水流中的输运过程和挟沙水流的运动规律，二是在水流和泥沙运动的作用下冲积河流形态的变化规律。流域的土壤侵蚀和产流产沙、与河流泥沙有关的河口三角洲及海岸演变等也属于河流动力学的研究范围。河流动力学已经有了较长的历史，发展了一些比较成熟的理论，但是至今仍有很多问题尚未得到完全解决。

我国河流众多，流域面积大于 100km^2 的有 5 万多条，流域面积在 1000km^2 以上的河流有 1500 多条。全国水力资源丰富，正常年径流量达 27100 亿 m^3 ，水能蕴藏量为 5.8 亿 kW。但在我国江河治理中，河流泥沙问题十分突出。大江大河流域内水土流失严重，造成大量泥沙输入河道，加剧了江河整治的复杂性，并带来严重危害。根据 20 世纪 80 年代初期统计，全国水土流失面积为 120 万 km^2 ，占全国国土面积的 12.5%，其中七大江河（黄河、长江、海滦河、淮河、辽河、松花江、珠江）水土流失面积占总流失面积的 85.8%（泥沙专业委员会，1999）。黄河是世界上泥沙最多的大河，多年平均年输沙量达 16 亿 t 之多。黄河中游的黄土高原丘陵沟壑区，平均每年侵蚀模数可达 $10000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。长江宜昌站平均年输沙量为 5.3 亿 t，仅次于黄河而居我国河流输沙的第二位。

泥沙既是丰富的资源，也能成为致灾因子。随着人口的增加，经济的发展，环境的变异，温室效应等影响，由泥沙为致灾因子直接或间接引发的灾害（主要是地质灾害和洪水灾害）越来越为人们所重视。我国是一个多山的国家， $2/3$ 为山地，加之人类活动的影响，因滑坡、泥石流和崩塌形成的泥沙灾害相当严重。据不完全统计，每年发生的滑坡数以万计，有泥石流沟一万多条，受到威胁的有 70 多座城市和 460 多个县城。正确地认识泥沙与泥沙灾害的类型及其成因机制，对维持区域经济持续发展具有十分重要的意义。

自然界和工程实际中的河流泥沙问题从物理现象上可以分为侵蚀、输运、沉积（堆积）三个类型，与地貌过程的三个环节相对应，各种过程所涉及的时空尺度变化范围极大。在一些情况下必须考虑地质构造的

上升、下降这类大尺度、长时期的过程，有时又必须考虑雨滴落下对坡地表面土壤的击溅侵蚀作用这类微尺度和瞬时的过程。由于这一特点，泥沙问题的研究包含了物理现象的宏观和微观两个方面。

一、土壤侵蚀 (Soil erosion)

土壤侵蚀有狭义和广义两种定义。狭义的土壤侵蚀是指地面土壤在外营力下被分离、搬运以及沉积的整个过程。广义的土壤侵蚀则是指在内外营力作用下，地表物质（包括土壤、母质、风化物 and 岩石）的分离、搬运以及沉积的整个过程，其中内营力包括现代构造运动（地震、火山爆发等）和重力作用，外营力包括降雨、水流、风力、冰川作用及各种人类活动等（陈永宗等，1988）。由于研究的出发点不同，土壤侵蚀问题中的有关概念在定义上有所差别，见表 0-1。

表 0-1 土壤侵蚀有关术语的定义

术 语		定 义	
		狭 义	广 义
土壤侵蚀		指地面土壤在外营力下被分离、搬运以及沉积的整个过程	内外营力作用下，地表物质（包括土壤、母质、风化物和岩石）的分离、搬运以及沉积的整个过程
按性质分类	正常侵蚀	土壤侵蚀速度小于或等于土壤形成速度、不破坏土壤及母质、不降低肥力（又称常态侵蚀、自然侵蚀、允许侵蚀或无明显侵蚀）	在不受人为影响条件下，自然营力对地表物质的分离、破坏和移动，是塑造山区和丘陵地貌形态的主要过程，一般不超过 0.5~1.0cm/a（又称地质侵蚀、自然侵蚀）
	加速侵蚀	土壤侵蚀速度大于或等于土壤形成速度，有时土壤侵蚀量相当于正常侵蚀的数十或数百倍	指侵蚀速度超过正常速度的侵蚀，分自然加速侵蚀（地震、火山、洪水等突发事件引起）和人为加速侵蚀（人类活动削弱抗蚀力引起）
按时间分类	古代侵蚀	第三纪以后，人类出现以前的地质时期内发生的侵蚀，包括第四纪冰川活动和地表径流的侵蚀作用，构成地貌基底	泛指地质历史时期的侵蚀，纯属自然侵蚀（又称地质侵蚀）
	现代侵蚀	指人类出现以后，自然因素和人类社会经济活动共同影响下引起的土壤侵蚀。人烟稀少的地区，或水保措施较好的地区，土壤侵蚀微弱，属现代正常侵蚀。若土壤侵蚀发展迅速、剧烈，对人类生存、环境生态危害甚大，则称现代加速侵蚀	指参与了人类活动影响，使自然侵蚀或者加速或者延缓，即人类活动在一定程度或一定范围内改变了地面自然过程的强度或方向。大多数情况下，人类活动促使侵蚀加速。由于人类活动对自然过程的影响因各地的自然条件和社会发展状况不同而有很大差异，采取统一的现代侵蚀时间界限是不恰当和不可能的

注 表中狭义和广义两种定义分别引自王汉存（1990）及陈永宗等（1988）。

水土流失 (soil loss) 的含义可分为两个方面, 第一是水的流失, 即自然植被生态遭毁坏后, 由于缺乏森林和植被的林冠和枯枝落叶层截流能力、林地土壤渗蓄能力的降低, 降雨后产流时间提前、产流量增加, 反映在流域水文特征上表现为洪峰形成快、峰值高、洪量大, 地表径流量增加而地下径流量减少。第二是与水的流失同时产生的土的流失, 在这个意义上土壤侵蚀和水土流失是同一现象的两个方面, 在定性描述时可以通用, 但严格来说, 在定量描述时两者有本质的区别。土壤侵蚀量指土壤侵蚀过程中, 所有发生移动的地表物质的总和。水土流失量则是指离开某一范围的地表物质总和, 特别是直接或间接起源于水力侵蚀的那部分物质。一般而言, 土壤侵蚀量都大于水土流失量。地表物质在分离之后被地表径流所输运时, 会因为地形和径流强度的复杂变化, 使得流动不能总是维持足够的挟沙力而产生淤积, 即不会全部到达坡基线或流域出口, 因此真正的土壤侵蚀量是难以测得的。野外观测到的实际都是土壤流失量。

土壤侵蚀与产沙 (sediment yield) 也是两个不同的概念。流域产沙是河床演变及泥沙运动力学中的概念, 在水文测量中一般指进入河道的地表物质总量, 它只是土壤流失量的一部分。流域侵蚀和流域产沙是紧密联系的, 如果没有侵蚀, 当然也就不会产沙, 但侵蚀产物并不一定会立即成为河流泥沙。这是由于全年降雨中, 存在多次沙不下坡或沙不出沟的降雨侵蚀过程。

以长江上游流域 (宜昌站以上) 为例, 20 世纪 80 年代的年平均侵蚀量为 15.7 亿 t, 同期长江宜昌站输出的悬移质平均每年 5.49 亿 t, 上游流域内 11385 座大中小型水库年平均淤积量为 1.51 亿 t (见朱鉴远, 1999)。输出的悬移质和水库淤积量约占侵蚀量的 45%, 即有一半以上被侵蚀物质堆积、沉积在流域内。水力输移的悬移质, 绝大部分被输出流域, 推移质和泥石流, 并非全部被输出流域, 其中一部分被水流从一地搬运到另一地, 仅空间位置随时间发生变化。流域内侵蚀模数并非各地相同, 侵蚀量中 14 亿 t 来自 35.2 万 km² 流域面积, 即 35% 的流域面积集中了 89% 的侵蚀量。按水系划分, 侵蚀量和泥沙输移量均以金沙江为首, 嘉陵江次之, 岷江居第三。表 0-2 为长江上游主要水系 20 世纪 80 年代年均侵蚀量、输移量。

我国有关部门根据侵蚀发生的营力, 把土壤侵蚀分为水蚀、风蚀和冻融侵蚀三个大类型, 并对每个类型进行了侵蚀强度分级, 统计出大于

表 0-2 长江上游主要水系年均侵蚀量、输沙量、水库淤积量统计表

水 系		金沙江	嘉陵江	岷 江	上游流 域总计	三江占上游 流域比值 (%)
侵蚀量 (亿 t/a)		5.57	3.97	2.15	15.7	74.5
悬移质输沙量 (亿 t/a)		2.73	1.40	0.571	5.49	85.6
水库淤积量 (亿 t/a)		0.223	0.597	0.236	1.51	69.9
输沙量和淤积量占侵蚀量比 值 (%)		53.0	50.3	37.5	44.6	
输移比		0.49	0.35	0.27	0.35	
集水面积 (万 km ²)		47.32	13.54	15.61	100.55	76.1
水土严重 流失区	面积 (万 km ²)	13.54	9.25	4.92	35.22	78.7
	侵蚀量 (亿 t/a)	4.46	3.80	1.94	14.0	72.9
	侵蚀模数[t/(km ² ·a)]	3290	4110	3940	3980	

注 引自朱鉴远, 1999。

允许侵蚀量的土壤侵蚀面积分别为: 水蚀面积 179 万 km², 风蚀面积 188 万 km², 冻融侵蚀面积 125 万 km², 三者的面积之和为 492 万 km², 占国土面积的 51.2%, 其中水蚀和风蚀面积之和为 367 万 km², 占国土面积的 38.2% (景可 1999), 而且约有 1/5 为强度侵蚀 [侵蚀模数达 5000~10000t/(km²·a)]。

土壤侵蚀和水土流失, 是河流工程泥沙问题的直接起因。

吴钦孝等(1998)采用径流观测小区试验的方法, 研究了黄土高原油松林地不同植被条件对产流产沙过程的影响。结果表明, 在地形、土壤、降水条件相同的条件下, 油松林地的蓄水对减少径流效果显著, 6 年合计地表径流深 14.07mm, 为农地的 12.0%, 土壤流失量 12.45t/km², 不足农地的 0.1%。即在试验条件下, 林地与农地相比可减少径流 88.0%, 减少泥沙 99.9%, 表明了森林巨大的水土保持功能。但林地去除枯落物层后, 径流量和泥沙量均有较多的增加, 与原状林相比, 分别增加了 5.1 倍和 26.5 倍。径流量为农地的 73.0%, 泥沙量相当于农地的 2.0%。可见, 林地枯落物层具有不可忽视的水源涵养作用和水土保持功能。

国内外大量的野外对比观测研究表明, 无论植被类型如何, 或者降雨条件及其地下垫面条件如何, 当植被盖度大于 70% 时, 地表的侵蚀量都是极其微弱的, 侵蚀量还不足裸地的 1%。当植被盖度小于 10% 时, 它

的减蚀作用基本没有反映。植被盖度在 10%~70% 之间时植被与侵蚀的关系比较复杂, 植被盖度的递增率与侵蚀量的递减率不是同一个数量级。从黄河中游皇皇川流域的观测研究得到, 地面植被盖度只有达到 30% 时才具有明显的防蚀作用。即皇皇川流域植被盖度小于 30% 时植被的防蚀作用迅速减少; 植被盖度为 15% 时减蚀作用不显著; 而植被盖度在 30%~60% 之间时侵蚀模数变化很小。主要原因是植被以草本与灌木为主, 地表缺少枯枝落叶层; 还有一个原因是, 该处短时暴雨强度大。相比之下, 黄河中游南部的植被盖度在 40%~50% 之间时, 侵蚀模数变化不明显。当盖度小于 20% 时, 防蚀作用才迅速减小。主要原因是林下有枯枝落叶层, 抗蚀、抗冲的力量都比北部同盖度增强 (景可等 1997, 68 页)。

土壤侵蚀的危害主要表现在以下几个方面:

(1) 水资源和土壤资源恶化。由于水土流失, 土层减薄, 土壤水分及肥力下降, 以长江流域为例, 水土流失面积占流域总面积的 40%, 年流失的土量相当于每年使耕地表层减少 1cm, 流失的养分相当于 4000 多万 t 的化肥量 (杨文治, 1990)。流域内植被的生长环境受到破坏, 植被覆盖面积减少, 水土流失加剧, 形成恶性循环。目前的土壤侵蚀如得不到及时治理, 将导致土壤肥力完全消失, 进而对土壤母质或母岩产生侵蚀, 毁坏土壤的再生能力, 使土壤资源永久性丧失。

(2) 农田、耕地水沙为害。黄土高原某些地区沟壑面积占土地总面积的 30%~50%, 沟壑纵横切割造成耕地的大面积破坏。红壤区的崩岗形成对土地的蚕食。土壤侵蚀后产生对流域内土地产生沙压、淤埋危害。有时甚至还会因河流泛滥对下游土地产生沙压、淤埋, 黄河下游历史上此类灾害十分频繁。

(3) 对下游水系的危害。湖泊面积缩小, 水面萎缩, 汛期蓄水能力减小。湖泊与湿地的生态环境受到永久性破坏。河床因淤积而抬高, 防洪能力降低。长江中上游河流通航里程减少, 年货运量下降。

(4) 流域内水库淤积、库容减少、水利设施效率降低。长江上游流域入长江泥沙量的增加直接威胁未来三峡水库的运行。据三峡库区分片计算, 坡面土壤年流失总量达 1.5 亿 t, 该区泥沙平均输移比为 0.28, 平均每平方公里流入长江的泥沙量为 895t, 整个库区的入江泥沙量为 0.44 亿 t (席承藩等, 1994)。

二、流域、河流中的泥沙运输

从流域整体上来考虑, 泥沙的运输有两个方面: 一是坡面、沟坡等

侵蚀产沙后沟道内的泥沙输移；二是支流、主流河道中的泥沙输运过程。在工程学时间尺度上来说，一个河段的上游下泄的水量和水流中所携带的泥沙量是决定此河段河床变形的主要因素，称为来水来沙条件。

(一) 泥沙输移比

从一个流域出口控制点输出的泥沙总量 S_T 并不等于从该流域地表侵蚀的泥沙总量 S_E ，两者之比 S_T/S_E 称为泥沙输移比（亦称递送比，Sediment Delivery Ratio）。泥沙输移比的概念最初是美国学者 C. B. Brown (1950) 为估计美国入河、入海的泥沙量而提出的。 S_T 、 S_E 两者之差就是自侵蚀发生地点到流域出口控制点之间的输运过程中，由于沉积作用而减少的沙量。

泥沙输移比涉及流域土壤侵蚀与产沙，即包括泥沙的侵蚀、输移和沉积等子过程。在每个子过程中，又有许多更次级的基本过程。影响流域泥沙输移比的主要因素为①地貌因素：坡长、坡度、坡形及坡向；②地质条件：土壤颗粒的岩性及其抗蚀性；③下垫面条件：植被、土壤含水量等；④水气气候条件：地面径流、降雨强度、降雨分布、降雨类型、降雨历时等。不同地区小流域输移比随流域面积的变化有显著不同，见表 0-3。

表 0-3 不同地区小流域输移比

Roehl 1962 (美国东南山地)		牟金泽, 孟庆枚 1982 (黄土丘陵沟壑区)		李青云等 1995 (四川紫色土丘陵区)	
流域面积 (km ²)	输移比	流域面积 (km ²)	输移比	流域面积 (km ²)	输移比
		0.18	1.00	0.01	0.95
		4.26	0.94	0.1	0.66
1.58	0.55	21.0	0.86	0.5	0.51
5.7	0.17	807	0.80	1.0	0.46
11.8	0.29	3893	0.83	5	0.36
45.8	0.18			10	0.32
78.4	0.21			50	0.25
190	0.085			100	0.22
431	0.092			500	0.17

地质因素对泥沙输移比的影响主要通过流域的地表岩性和产沙颗粒反映出来。河流泥沙主要来自地面侵蚀物质，而地面侵蚀物质取决于其下垫面岩性。不同岩性的抗风化力、产沙粒径及组成的不同，将影响到地面侵蚀物质和河流输沙量的不同，泥沙输移比亦将有所不同。卢金发(1989)对燕山地区的研究得到了反映侵蚀切割程度指标与岩性的关系，

并对不同岩性泥沙输移比进行计算, 结果表明流域岩性不同, 其侵蚀强度与泥沙输移比有很大的区别。我国北方黄土高原地表组成物质多粉沙, 受侵蚀后易被流水带走, 因此黄土丘陵沟壑区的泥沙输移比接近于 1。我国南方多岩石构成的山地丘陵区, 泥沙输移比相对较小, 大多低于 0.3, 少量为 0.5, 这与我国南方土地侵蚀物质颗粒粗大, 沟道径流中推移质数量大, 中小河流、塘库、湖泊淤积量大等因素有密切关系(余剑如等, 1991; 张凤洲, 1993)。

(二) 干流输沙

冲积河流的一个最主要的功能, 就是排泄上游流域中产生的洪水, 并将进入河道的泥沙向下游输运。河道泄洪排沙能力的降低, 往往会产生严重的灾害。由表 0-4 和表 0-5 可见, 黄河下游的含沙量和年总输沙量均居世界第一, 属于有强烈堆积活动的青壮年河流。由于黄河上游的多年平均来沙量大大超过了下游河道中水流的挟沙能力, 多沙游荡的性质十分明显, 河床变形剧烈, 泥沙在河道内大量淤积。长江多年平均输沙量 5.3 亿 t (宜昌站), 居世界各河流中第四位, 每年入海泥沙量为 4.68 亿 t, 有 3 亿多 t 泥沙在中、下游河道和湖泊中沉积下来。其直接结果是抬高河床, 淤塞水库和减小湖泊容积, 降低调蓄洪水的能力。根据长江干流泥沙输运情况计算, 宜昌至城陵矶段全长 410km, 每年淤沙共达 1.64 亿 t, 平均淤积泥沙 40 万 t/km, 使荆江河段日益增高(史德明, 1999), 形成“万里长江, 险在荆江”的悬河(洪水位高出地面 8~10m)。

表 0-4 国外多沙河流径流量、泥沙特征表

国 名	河 名	流域面积 (万 km ²)	水 量		沙 量		输沙模数 [t/(km ² ·a)]
			年平均 流量 (m ³ /s)	年平均 水量 (亿 m ³)	年平均 含沙量 (kg/m ³)	年平均 输沙量 (亿 t)	
印度、孟加拉	恒 河	95.5	11760	3710	3.92	14.51	1519
巴基斯坦	印度河	96.9	5500	1750	2.49	4.35	450
孟加拉、印度	布拉马普特拉河	66.6	12180	3840	1.89	7.26	1089
緬 甸	伊洛瓦底河	43.0	13550	4270	0.70	2.99	695
越 南	红 河	11.9	3900	1230	1.06	1.30	1090
柬埔寨、越南	湄公河	80.0	11100	3500	0.49	1.7	210
美 国	密苏里河	137.0	1953	616	3.54	2.18	159
美 国	密西西比河	323.0	17900	5645	0.55	3.12	96.6
美 国	科罗拉多河	63.7	155	49	27.5	1.35	212
巴 西	亚马逊河	577.0	18100	57100	0.06	3.63	63
埃 及	尼罗河	297.8	2830	892	1.25	1.11	37

表 0-5 国内多沙河流径流量、泥沙特征表

河 名	流域面积 (万 km ²)	河流全长 (km)	水 量		沙 量			备 注
			年平均 流量 (m ³ /s)	年平均 水量 (亿 m ³)	年平均 含沙量 (kg/m ³)	年平均 输沙量 (亿 t)	输沙模数 [t/(km ² ·a)]	
黄 河	75.24	5464	1470	464.0	33.6	15.6	2260	黄河支流
窟野河	0.87	241.8	24.7	7.8	169	1.32	15300	
长 江	180.7	6300	29200	9600	0.54	5.14	280	海河支流
永定河	5.0	650	45	14.2	57.7	0.82	1673	
珠 江	45.26	2216	10990	3465	0.24	0.834	195	
辽 河	16.6	1404	177.6	56	6.86	0.41	240	
淮 河	26.2	1000	827.6	261	0.46	0.14	153	

注 表 0-4、表 0-5 引自中国水利学会泥沙专业委员会主编的《泥沙手册》，中国环境科学出版社，1992。

(三) 水库淤积

流域的来水来沙条件和河流的边界条件因人类活动而发生改变时，如修建水库大坝、河道渠化、河道整治等，将会引起挟沙能力的改变。水库中拦截泥沙，下游的来水来沙量将会发生巨大的变化，从而对工程上、下游的河床演变产生巨大影响。水库淤积的速度，与上游土壤侵蚀和水土流失的程度直接相关。随着各类大中型水库的兴建，流域内的土壤侵蚀问题也会越来越明显地暴露出来。黄河三门峡水库 1960 年 9 月开始蓄水运用时，设计库容为 96.4 亿 m³，坝前水位 323m 的库容为 36 亿 m³。经蓄清排浑控制运用，至 1990 年，三门峡坝前水位 330m 时的可用库容稳定在 30.6 亿 m³，坝前水位 323m 时的库容稳定在 10 亿 m³ 左右。在此期间的三门峡水库淤积量如表 0-6（赵文林，1996，第 83 页）。

表 0-6 三门峡水库淤积情况

运用方式	时 段 (年·月)	河道入 库沙量 (亿 t)	水库淤积量 (亿 m ³)		
			潼关以下	潼关以上	全库区
蓄水运用及滞洪运用期	1960.9~1964.10	76.7	35.8	8.7	44.4
滞洪运用 (改建期)	1964.11~1973.11	163.0	-9.2	20.9	11.7
蓄清排浑控制运用	1973.11~1985.10	128.8	0.4	-0.5	-0.1
	1985.11~1990.10	41.3	1.1	3.2	4.3
小 计		409.8	28.1	32.2	60.3

在长江流域中调查统计了 23 座大型水库、12 座中型水库、182 座小型水库、6492 座塘堰的淤积量，其总库容为 260 亿 m^3 ，淤积量为 13.8 亿 m^3 ，淤积量占总库容的 5.29% 见表 0-7，（引自席承藩等，1994）。

表 0-7 长江流域部分水库塘堰淤积统计

水库类型	数量 (座)	库容 (亿 m^3)	淤积量 (亿 m^3)	淤积量占库容 (%)
大型水库	23	256.38	12.93	5.04
中型水库	12	2.575	0.242	9.4
小型水库	182	0.923	0.198	21.4
塘 堰	6492	0.742	0.415	55.9
合 计	6709	260	13.8	

从长远的观点来看，解决泥沙问题的根本途径是减少人为的加速侵蚀，恢复流域的植被，保护和改善流域内的生态系统，减少水土流失。但实现这一目标需要巨大的财力投入，生态环境的自然恢复过程也较慢。因此，在未来相当长的时间内，我国河流的泥沙问题仍将十分严峻。在河流和流域的开发治理中还将遇到许多与泥沙有关的工程问题，为了能够作出符合自然规律的正确工程决策，必须详细地研究河流泥沙运动的规律。

三、本教材的编写体系

本教材的编写沿用钱宁、万兆惠著《泥沙运动力学》一书的体系，首先给出泥沙颗粒的来源、性质、沉速，讨论泥沙运动的基本概念，介绍了与河流动力学有关的一些明渠紊流研究成果。结合沙波运动，讨论了冲积河流阻力的计算方法。随后详细探讨了泥沙的起动问题，并对描述推移质运动和悬移质运动的各种理论作了系统总结，对水流挟沙力的计算方法进行了归纳。最后讨论了泥沙存在对水流的影响问题。

河流动力学是一门正在发展中的学科，所涉及的专业领域也较为宽广，虽已有许多专著和教材问世，但随着我国对河流泥沙问题的日益重视和研究的不断深入，近年来在各个方面又有了很多新进展。本教材在力求内容精简、体系完整的同时，在编写过程中还尽可能地把近年来发表的对河流动力学的基本理论有重要意义和重要应用前景的科研成果进行了总结，并列出了详细的参考文献，以便于科研工作者和工程技术人员了解和掌握本学科的发展。

第一章 泥沙颗粒的基本性质

“泥沙”指所有在流体中运动或受水流、风力、波浪、冰川及重力作用移动后沉积下来的固体颗粒碎屑（钱宁、万兆惠，1983）。泥沙颗粒大小相差十分悬殊，其粒径可相差百倍、千倍，甚至万倍，其体积可相差亿倍。可见泥沙是不同等级颗粒碎屑物的总称。泥沙颗粒在流体中的运动除了取决于流动特性之外，还与泥沙颗粒的物理、化学特性有关。泥沙颗粒的存在，又会影响流体的物理特性如流变性质等。因此泥沙颗粒及颗粒—流体混合体的物理特性，是泥沙运动学和河流动力学的基础。泥沙颗粒由岩石风化、破碎而成，最终形成的颗粒在粒径大小、矿物成分、化学特性等方面差异很大，与水体掺混后所形成的含沙水体也相应地在流变性质等物理特性上表现出较大的不同。

第一节 风化过程与地表物质组成

岩石和矿物在地表（或接近地表）环境中，受物理、化学和生物作用，发生体积破坏和化学成分变化的过程，称为风化作用。风化作用受气候、岩石成分、结构构造、植被、地形和时间等因素影响。

一、风化作用的阶段及其产物

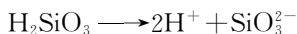
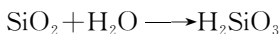
风化作用主要有物理风化作用（包括温差、冰劈、植物根劈、盐类结晶以及岩石卸载释重引起的剥离等）和化学风化作用（包括溶解、水解、水化、碳酸盐化、氧化和生物化学风化等作用）两种类型。根据风化作用的强度和性质，可以划分出不同的风化阶段，在不同的风化阶段，物理风化与化学风化所起的作用不同，形成的产物也各有其特点。

（1）碎屑残积阶段及其产物。在风化的初期，以物理风化为主。物理风化作用使岩石在原地发生崩解，形成残留于原地的岩石碎屑，物理风化作用形成的岩石碎屑最小粒径可达 0.02mm 左右，岩石化学成分基本不变，因此称为碎屑残积阶段。此阶段化学风化居次要地位，只能形成少量的蛭石、伊利石、绿泥石等风化程度较低的粘土矿物。

（2）钙质残积阶段及其产物。在物理风化作用的基础上，进一步发

生化学风化（溶解、水解、碳酸盐化等）。在化学风化的早期阶段，铝硅酸盐矿物中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等碱金属和碱土金属阳离子逐步被极化水分子溶液中的 H^+ 置换出来，从矿物晶格中离析出来，与溶液中的 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等离子结合形成氯化物、碳酸盐和硫酸盐。卤族元素（I, F, Cl, Br）和氯化物（KCl, NaCl）容易随水流失，而碳酸盐和硫酸盐难于溶解，以含钙矿物（方解石 $CaCO_3$ ，石膏 $CaSO_4$ ）等形式残留在风化层中，使 Ca 相对富集，故称这一阶段为钙质残留阶段或富钙阶段。

(3) 硅铝残积阶段及其产物。化学风化作用的深入进行将使硅酸盐矿物晶体破坏，部分硅和铝从矿物中析出， SiO_2 溶于水形成硅酸真溶液或胶体溶液，与带正电胶体（如氢氧化铁）相遇而电性中和，胶体微粒凝聚沉淀形成溶胶。纯 SiO_2 的含水凝胶（ $SiO_2 \cdot nH_2O$ ，即蛋白石）经脱水转化为玉髓（ SiO_2 ）或粉末状 SiO_2 （称粉石英），



铝硅酸盐矿物分解出的另一部分硅和铝在地表结合形成各种粘土矿物，其化学通式为 $Al_2O_3 \cdot m SiO_2 \cdot nH_2O$ ，依地表水介质环境由弱碱性 \rightarrow 酸性的变化，分别形成伊利石（水云母）、蒙脱石（胶岭石）与高岭石等粘土矿物。通常蒙脱石、高岭石形成于湿润气候条件，而伊利石则是较干冷气候条件的产物。由于硅酸和地表次生粘土矿物的形成，硅、铝在风化碎屑中相对富集，故又称为富硅铝阶段或粘土形成阶段。

(4) 铁铝残积阶段及其产物。化学风化作用的最后阶段，硅酸盐全部分解，地表粘土矿物也可分解，可以迁移的元素均已析出。风化碎屑中主要形成大量铁、铝和 SiO_2 胶体矿物，以水铝石（ $Al_2O_3 \cdot n H_2O$ ，铝土矿，或有 Fe, Mn 混入）、褐铁矿（ $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ）、水赤铁矿（ Fe_2O_3 ）、针铁矿等为主。这些矿物在地表条件下稳定，并大量残留在原地，使风化产物中铁、铝相对富集，形成富含高价铁的粘土，即红土。所以此阶段又称富铁铝阶段或红土形成阶段。

二、残积物与风化壳

残积物指地表岩石经受风化作用发生物理破坏和化学成分改变后，残留在原地的堆积物。具多层结构的残积物剖面称风化壳，所以风化壳和残积物是同义语。残积物的特征可以用残积物岩性和残积物的结构构造来描述。由于不同的气候条件对风化作用的影响，不同的气候带风化