

泥沙运动力学

钱宁 万兆惠 著

科学出版社



泥 沙 运 动 力 学

钱 宁 万兆惠 著

科 学 出 版 社

1 9 9 1

内 容 简 介

本书主要阐述各种固体颗粒在江河、荒漠、海滨及管路中在流水、风力、波浪和重力作用下的起动、搬运和沉积规律,比较系统地介绍了国内外有关本学科的最新研究成果。叙述中,力求说明现象的物理本质,勾画出不同形式的运动所遵循的统一规律。本书除对几家主要的理论作了介绍和评价以外,还着重引用了各方面所进行的大量实验成果;对现有的经验或半经验性公式和计算方法,则作了一定程度的综合、对比和归纳,以便从实际工作的读者能从中进行必要的选择。

本书可作为水利、力学及地质地理等方面的有关专业的研究生教材,亦可供这些专业的设计、科研及教学人员参考。

泥 沙 运 动 力 学

钱 宁 万兆惠 著

责任编辑 杨家福

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

*

1983年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1991年6月第三次印刷 印张:41 3/4

印数:2 101—3 010 字数:972 000

ISBN 7-03-002321-8/TV·7

定价: 25.90 元

序 言

泥沙运动力学属于基础技术科学，主要研究泥沙颗粒在重力、流水、波浪和风力作用下的冲刷、搬运和沉积过程。作为一门独立的学科，虽已有不少专著问世，但把各种动力作用及边界条件下的泥沙运动统一在一个体系里进行详细介绍，本书还是初次尝试。早在四十年代后期，作者在国外即已开始搜集这方面的大量资料。五十年代回国后曾就此编成讲稿在高等院校、科研单位及生产部门多次试讲，并根据学员的反映及学科进展所不断提供的新成果，数易其稿。六十年代初期，本书前十六章的初稿业已完成，其中前十二章曾以“泥沙运动的基本规律”为题，印发了油印交流材料，该材料为不少单位再三翻印。七十年代后期，作者又根据国内外最新进展，对原稿作了彻底的修改和补充，并将内容扩大为十七章，卒成此书。在最后一次订正中，万兆惠同志协助我完成二、三、四及十二章的编写工作。

回顾本书编写过程，握笔伊始，犹在华年，而今掩卷住笔，竟已白发苍苍。三十年沧桑，经历了多少风风雨雨，此书方得以最后完成付梓。谨以此书献给在祖国四化建设中辛勤劳动的泥沙工作者。若能对他们今后的工作有些助益，衷心自是十分宽慰愉悦的。

我本人是在H. A. 爱因斯坦教授教导下，开始接触泥沙问题的。我和他相处七年，情谊深挚，他的谆谆教诲，言犹在耳。遗憾的是，他于1974年行将访华前夕不幸病故，未能亲眼见到新中国在共产党领导下泥沙事业的蓬勃发展。我在这里聊志数语，以寄托对他的怀念和哀思。

此书之成，是和维瑶几十年的支持帮助分不开的。张书农、范家骅、华国祥等同志曾对原稿提了不少宝贵意见，江天锦同志负责全书的描图工作，杨美卿、陈宝瑜同志最后对文稿作了细致的校正，我谨向他们深表谢意。

钱 宁

一九八一年十一月二十九日于清华园

目 录

序言	i
第一章 绪论	1
第一节 泥沙问题在生产实践中的重要性	1
第二节 学科的性质及现状	5
第三节 编写原则及章节安排	7
参考文献	8
第二章 泥沙的形成及性质	10
第一节 泥沙的来源和岩石的风化	10
第二节 泥沙的基本性质	14
一、颗粒性质	14
二、群体性质	21
三、细颗粒泥沙表面的物理化学作用	28
第三节 浑水的性质	32
一、浑水的容重、含沙量及其表示方式	32
二、浑水的粘性	33
第四节 泥沙的分类	40
参考文献	41
第三章 泥沙的沉速	43
第一节 圆球在静水中的沉淀运动	43
第二节 颗粒形状对沉速的影响——天然泥沙的沉降规律	48
一、泥沙在沉降过程中的方位问题	48
二、几何形状规则的物体的沉降规律	50
三、天然泥沙的沉降规律	52
第三节 边界条件对沉速的影响	55
第四节 含沙浓度对沉速的影响	58
一、含沙量低时浓度对均匀沙沉速的影响	59
二、含沙量高时浓度对均匀沙沉速的影响	60
三、混合沙的沉降规律	64
四、不同排列组合的泥沙在沉降中的受力情况	68
第五节 紊动对沉速的影响	71
一、紊动对沉速影响的分析研究	71
二、紊动对沉速影响的试验研究	72
第六节 絮凝对沉速的影响	74
一、产生絮凝现象的泥沙粒径范围	74
二、絮团的沉速及影响絮团形成的因素	74
三、絮凝结构的形成及对沉速的影响	77
参考文献	79

第四章 水流的紊动	82
第一节 紊流的性质	82
一、层流与紊流	82
二、紊动的产生	84
三、动量交换及紊动应力	86
四、猝发现象	87
五、紊动漩涡的结构和组成	93
第二节 经典紊流理论	94
一、掺混长度理论	94
二、紊流相似假说	97
三、紊动统计理论	98
第三节 明渠水流中紊动特性的量测资料	102
一、明渠水流中紊动特性的量测手段	102
二、明渠水流紊动特性的主要量测成果	102
参考文献	109
第五章 有关泥沙运动的一些基本概念	111
第一节 床面泥沙颗粒的受力情况	111
一、拖曳力与上举力	111
二、粘结力	116
三、粒间离散力	117
四、渗透压力	118
第二节 泥沙颗粒的几种运动形式	119
一、接触质	119
二、跃移质	119
三、悬移质	122
四、层移质	122
五、推移质及悬移质的相对重要性	123
第三节 划分推移质及悬移质的意义	125
一、泥沙运动的连续性	125
二、推移质与悬移质在物理本质上的区别	125
三、定床与动床上的泥沙运动	128
四、划分推移质与悬移质的实际意义	129
第四节 床沙质与冲泻质	129
一、问题的提出	129
二、床沙质及冲泻质运动规律的同—性	130
三、流量—输沙率关系	133
四、划分床沙质及冲泻质的标准	135
五、区别床沙质及冲泻质的意义	136
参考文献	138
第六章 沙波运动	140
第一节 沙波的发展消长	140
一、沙纹	140
二、沙垄	142

三、平整	144
四、沙浪	145
五、急滩与深潭	147
第二节 沙波面上的水流条件及泥沙运动	148
第三节 沙波形成的机理	151
一、沙纹的成因	151
二、沙垄及沙浪的成因	154
第四节 床面形态的判别准则	165
一、平整-沙纹-沙垄区的判别准则	166
二、沙垄-平整-沙浪区的判别准则	168
第五节 沙波的几何及运动特征	170
一、沙波几何形态的统计特征	170
二、沙波平均波长及波高与水流、泥沙条件的关系	173
三、沙波运动速度与水流、泥沙条件的关系	178
第六节 研究沙波运动的意义	179
一、沙波是冲积河流阻力的主要组成部分之一	179
二、沙波的发展消长有时会造成水位-流量关系的异常现象	180
三、根据沙波尺寸及运动条件, 可以估算推移质输沙率	180
参考文献	182
第七章 冲积河流的阻力	184
第一节 水流能量的转换过程	184
一、水流所提供的能量	184
二、就地克服阻力而损失的能量	185
三、能量的传递	185
四、能量平衡方程式	186
五、近壁流区的重要性	187
六、因克服阻力而损失的能量最后散失为热能	187
第二节 摩阻作用的组成单元	188
一、沙粒阻力	188
二、沙波阻力	189
三、河岸及滩面阻力	189
四、河槽形态阻力	189
五、人工建筑物的外加阻力	189
第三节 研究冲积河流阻力问题的合理途径	190
第四节 综合阻力与部分阻力之间的关系的方法	194
一、作用于不同周界上的阻力单元的处理方法	194
二、作用于同一周界上的阻力单元的处理方法	199
第五节 各阻力单元的表达方式	201
一、沙粒阻力	201
二、沙波阻力	209
三、河岸阻力	215
四、河漫滩阻力	215
第六节 综合阻力的表达方式	219

一、钱宁-麦乔威综合阻力公式	219
二、日本吉川秀夫等的处理方法	219
三、李昌华-刘建民阻力关系	220
第七节 有关阻力的几个问题的讨论	221
一、大糙率尺寸的阻力计算方法	221
二、水温对阻力的影响	223
三、河床渗透性对阻力的影响	225
参考文献	225
第八章 泥沙的起动	229
第一节 泥沙起动现象的随机性	229
一、起动现象的描述	229
二、泥沙起动的判别标准	230
第二节 无粘性均匀沙的起动条件	233
一、起动条件的不同表达形式	233
二、三种起动条件表达形式的比较	241
三、斜坡上的泥沙起动条件	244
四、断面周界上的剪切力分布	246
第三节 无粘性非均匀沙的起动条件	249
一、非均匀沙起动条件的物理涵义	249
二、给定水流及床沙组成条件下的临界粒径	249
三、考虑粗化过程的混合沙临界拖曳力	251
第四节 粘性土的起动条件	253
一、新淤粘性土的起动条件	253
二、固结粘性土的起动问题	256
参考文献	259
第九章 推移质运动	262
第一节 均匀推移质的运动规律	262
一、梅叶-彼德公式	262
二、拜格诺公式	265
三、爱因斯坦推移质运动理论	270
四、亚林推移质公式	278
五、恩格隆公式	279
六、阿克斯-怀特公式	281
七、以平均流速为主要水力指标的推移质运动公式	281
第二节 各家推移质公式的比较	283
一、公式结构的分析与转化	283
二、梅叶-彼德、爱因斯坦、拜格诺、亚林、恩格隆及阿克斯-怀特公式的比较	285
三、沙莫夫、列维、岗恰洛夫推移质公式的比较	289
第三节 非均匀推移质的运动规律	289
一、推移质公式中床沙代表粒径的确定	290
二、混合沙中各级粒径泥沙的输沙率	291
参考文献	296
第十章 悬移质运动	298

第一节	紊动的猝发性质及泥沙的悬浮过程	298
一、	实验条件	298
二、	泥沙运动轨迹	299
三、	泥沙颗粒自床面的起扬及达到悬浮最高点后的下落过程	299
四、	泥沙运动速度	302
五、	悬浮泥沙运动机理	302
第二节	泥沙扩散方程	303
第三节	悬移质含沙量的垂线分布	306
一、	扩散理论	307
二、	重力理论	321
第四节	悬移质输沙率	324
一、	爱因斯坦悬移质输沙率公式	324
二、	维利卡诺夫悬移质输沙率公式	325
三、	拜格诺悬移质输沙率公式	327
第五节	不平衡输沙问题	328
一、	冲刷过程中的含沙量沿程恢复问题	329
二、	淤积过程中的含沙量沿程递减问题	333
第六节	污染物质在水体中的散布	335
一、	中性物质的扩散和离散	336
二、	扩散系数的确定	338
三、	离散方程的解及离散系数的确定	340
	参考文献	343
第十一章	水流挟沙力	346
第一节	床沙质挟沙力公式	346
一、	理论公式	346
二、	经验或半经验公式	353
三、	公式的比较及资料范围的检验	364
第二节	包括冲泻质在内的全沙沙量的估算	365
一、	利用水文站实测流量-输沙率关系推求年沙量	366
二、	根据流域因素估算来自流域并汇入江河的沙量	371
三、	根据水库淤积量估算流域产沙量	374
第三节	有关水流挟沙力的若干问题的讨论	374
一、	挟沙力的双值(或多值)关系问题	374
二、	水温对水流挟沙力的影响	376
	参考文献	380
第十二章	泥沙的存在对水流的影响	382
第一节	泥沙颗粒对水流紊动结构的影响	382
一、	紊动强度的实测资料	382
二、	泥沙颗粒引起的反映紊动特性的参数的变化	385
三、	泥沙影响紊动结构的讨论	387
第二节	泥沙颗粒对流速分布的影响	391
一、	悬移质影响流速分布的试验资料	391
二、	主流区的流速分布	393

三、近底区的流速分布	398
四、包括近壁流区在内的全部流区中的流速分布	400
第三节 泥沙运动对水流能量损失的影响	401
一、周界变化与泥沙运动对水流能量损失的影响	401
二、推移质对水流能量损失的影响	402
三、悬移质对水流能量损失的影响	403
第四节 水流条件因泥沙的存在而改变后进一步对泥沙运动的影响	411
一、近底含沙量梯度的存在及由此而引起的流速分布的变化对垂线含沙量分布的影响	411
二、细颗粒泥沙的存在对粗颗粒泥沙的运动的影响	413
参考文献	414
第十三章 高含沙水流及泥石流	416
第一节 高含沙水流	416
一、概况	416
二、流动特性	417
三、泥沙运动特性	425
第二节 泥石流	435
一、概况	435
二、泥石流的类型	436
三、运动特征	437
四、水力类泥石流的运动机理	440
五、泥石流的运动速度和阻力	444
参考文献	446
第十四章 异重流	448
第一节 异重流的形成和运动	448
一、异重流与一般明渠水流的异同	448
二、异重流的形成条件	451
三、异重流的运动	452
第二节 选择性引水	473
一、各种特定条件下的选择性引水	473
二、水库异重流排出数量	477
第三节 异重流的扩散、传输和沉积	479
一、异重流界面的稳定问题	480
二、异重流失去稳定后的扩散和传输	484
三、异重流中泥沙的沉淀	485
第四节 高浓度异重流	486
一、河流高浓度异重流	486
二、水库高浓度异重流	487
三、海底高浓度浑浊流	488
参考文献	490
第十五章 风沙运动	493
第一节 风沙运动的基本形式及与流水输沙的主要差别	493
一、风沙运动的基本形式	493
二、流水和空气中泥沙运动的主要差别	495

第二节 荒漠上的风速分布	497
一、没有发生泥沙运动以前的风速分布	497
二、有泥沙运动时的风速分布	499
第三节 泥沙在风力吹扬下的运动规律	501
一、泥沙的起动	501
二、推移质运动	503
三、悬移质运动	503
第四节 风成床面形态的发生与发展	509
一、风成床面形态的基本类型	509
二、沙丘移动的规律	515
参考文献	516
第十六章 波浪作用下的泥沙运动	518
第一节 概述	518
一、问题的性质	518
二、水槽试验技术	519
第二节 波浪的基本性质	519
一、波浪的产生和传播	519
二、波浪的运动性质	522
三、边界层的发生发展	525
四、波浪行近岸线时所发生的变化	530
五、近岸带由波浪产生的流动	532
第三节 波浪掀沙的机理	537
一、泥沙的起动	538
二、波浪作用下泥沙运动的轨迹	544
三、推移质运动	546
四、悬移质运动	549
五、全沙输沙率	553
第四节 泥沙的沿岸运动	554
一、泥沙沿岸运动的基本形式	554
二、沿岸流挟沙能力	555
第五节 垂直于海岸方向的泥沙运动及海滩剖面的塑造	558
一、质体流所引起的垂直于岸线的泥沙运动	558
二、泥沙运动方向——中立线的概念	558
三、岸坡剖面的塑造	559
第六节 波浪作用下的浮泥运动	561
一、浮泥运动的基本现象	561
二、底部浮泥流	562
三、浮泥的悬扬	564
四、浮泥对波浪的阻尼作用	565
第七节 海成沙丘的形成和发展	565
一、沙纹	565
二、沿滨沙坝	569
参考文献	573

第十七章 管路中的固体输送	577
第一节 管路中泥沙运动的形式及流区的划分	577
一、泥沙运动的基本形式	577
二、管道二相水流的流区划分	578
三、管道二相水流和明渠二相水流的异同	579
第二节 均质浆液在管路中的运动	580
一、层流运动	580
二、自层流到紊流的过渡	587
三、紊流运动	588
第三节 水平管路中的两相流运动	590
一、以水为输送介质时的两相流运动	590
二、以均质浆液为输送介质时的两相管流运动	615
第四节 垂直及倾斜管路中的固体输送	617
一、垂直管道中的阻力损失	617
二、倾斜管道中的阻力损失	618
第五节 减阻问题	619
一、高分子聚合物减阻	620
二、纤维状材料减阻	623
三、充气减阻	623
四、细颗粒减阻	624
第六节 管道两相流运动研究中存在的问题及改进途径	626
参考文献	629
结束语	633
附录	635
一、常用符号表	635
二、人名索引	642
三、内容索引	649

第一章 绪 论

泥沙运动力学研究泥沙在流体中冲刷、搬运和沉积的规律。把自然现象及生产应用中的各种泥沙运动（包括泥沙在河渠、荒漠、水库、海滨及管路中在流水、风及波浪作用下的运动）统一在一本书内进行系统的介绍，对于本书还是初次尝试，这反映了生产实践的需要，象征着一门新的学科正在形成和成长。

第一节 泥沙问题在生产实践中的重要性

我国东北的南部以及长城以南、秦岭以北、西迄青海东部、东至海滨的广大黄河流域，都广布黄土。黄土质地均匀，粉砂含量占60~70%，缺乏团粒结构，粒间的固结主要依赖硫酸钙质，这种硫酸钙质遇雨水淋融极易溶解流失，加以黄土孔隙率高达40%左右，上下节理十分发育，抗蚀能力很差。解放以前，在反动阶级的长期统治下，流域内植被普遍遭到破坏，更加剧了土壤的侵蚀。解放以来，虽然努力开展了水土保持工作，但迄今水土流失的严重局面仍未扭转。据初步统计，黄河中游地区每年每平方公里中被冲去的土壤约为3,700吨，为全世界土壤平均侵蚀模数134吨/公里²/年的27.5倍。自流域内冲刷外移的巨量泥沙，通过小溪山涧，汇集于大江巨河，使我国西北及华北地区的一些河流的含沙量之高，世界无出其右。表1-1列出了世界各国主要河流的输水量及输沙量⁽¹⁾。据统计，世界大河中，悬移质年输沙总量超过一亿吨的有十三条，我国黄河总沙量和平均含沙量均居首位，其次是印度、孟加拉国的恒河，年总输沙量为14.51亿吨，但平均含沙量只有3.92公斤/米³，孟加拉国的布拉马普特拉河居第三，年总沙量为7.26亿吨，平均含沙量为1.89公斤/米³。黄河、长江的总输沙量占世界十三条大河总沙量的29.3%。事实上，黄河中游的某些支流挟沙之多更在于流之上，例如甘肃祖厉河的多年平均含沙量就接近600公斤/米³，有些河流的实测最大含沙量可以达到1,600公斤/米³左右，亦即泥沙的体积占水体体积的60%。古语说：“泾水一石，其泥数斗”，指的正是这种情况。

多沙河流与清水河流相比，具有迥然不同的特色，会给生产带来一系列问题，其中主要包括下面几个方面：

(1) 防洪问题。我国北方地区河流的洪水多由暴雨造成，峰高量大，暴涨猛落，河槽来不及宣泄，一旦决口，数千里原野尽成泽国。洪水的泛滥成灾又与上游来沙过多并在河床大量停积有关，一则河床日益抬高，行洪能力减低，一遇非常洪水，就有漫堤溃决的危险，二则河身宽浅，主流迁徙无常，洪水一旦顶冲大堤，又有引起破堤冲决的可能。以黄河下游为例，自周定王五年到解放以前的二千五百多年中，黄河决口泛滥1,593次，较大的改道就有26次。北宋以后，平均说来更是无岁不决，水灾波及的地区北至天津，南可到淮河。解放以后，黄河下游的面貌开始有了转变，三十年安度伏秋大汛，河决泛滥、一片汪洋、田庐人畜、荡然无存的凄凉情景再未出现。但与此同时，河床的堆积仍在发展，现

有河道经过长期行水，已经成为横亘华北大平原的分水岭，而且千里大堤，溃于蚁穴，如何确保防洪安全，仍是一个迫切需要解决的问题。

表1-1 世界主要河流输水量及输沙量的比较

(1) 国内部分

流域	河流	流域面积 (公里 ²)	河长 (公里)	测站名称	年水量 (亿米 ³)	年沙量 (亿吨)	平均含沙量 (公斤/米 ³)	最大含沙量 (公斤/米 ³)	侵蚀模数 (吨/公里 ² /年)
黄河	黄河	752,400	5,464	三门峡	432	16.40	37.6	911	2,480
长江	长江	1,807,200	6,300	大通	9,211	4.78	0.54	3.24	280
海河	永定河	50,800	650	官厅	14	0.81	60.8	436	1,944
淮河	淮河	261,500	1,000	蚌埠	261	0.14	0.46	11.0	153
辽河	辽河	166,300	1,404	铁岭	56	0.41	6.86	46.6	240
	大凌河	23,200	360	大凌河	21	0.36	21.9	142	1,490
珠江	西江	355,000	2,055	梧州	2,526	0.69	0.35	4.08	260

(2) 国外部分¹⁾

国别	河流	流域面积 (公里 ²)	年水量 (亿米 ³)	年沙量 (亿吨)	平均含沙量 (公斤/米 ³)
美国	科罗拉多河	637,000	49	1.35	27.5
印度, 孟加拉	恒河	955,000	3,710	14.51	3.92
美国	密苏里河	1,370,000	6,160	2.18	3.54
巴基斯坦	印度河	969,000	1,750	4.35	2.49
孟加拉, 印度	布拉马普特拉河	666,000	3,840	7.26	1.89
埃及, 苏丹	尼罗河	2,978,600	892	1.11	1.25
越南	红河	119,000	1,230	1.30	1.06
缅甸	伊洛瓦底江	430,000	4,270	2.99	0.70

1) 摘自D. K. Todd, Water Encyclopedia, Water Information Center, 1970, p. 85.

随着水利建设事业的蓬勃发展，黄河流域清水来源区的水利资源首先得到开发利用，而水土流失区的泥沙来量则减少不多或未见改变，因而下游洪水的含沙量就越来越高。1977年8月初黄河下游出现一次高含沙洪峰，小浪底的最大含沙量达到898公斤/米³。当高含沙水流漫上滩地以后，由于滩地水深小、流速低、漫滩水流停滞下来不能保持流动状态；这对下游河段来说，相当于削减了一部分水量，使得花园口以上近百公里河段在洪峰涨水过程中沿河水位突然降落0.7~1.3米。洪峰继续上涨以后，滩地水深逐渐增加，滩面边坡剪切力不断加大，滩地上停滞的浆液又开始流动，其效果相当于增添了一部分水量，又引起下游水位的陡涨。其中驾部站在一个半小时内水位陡涨2.84米。尽管没有支流加水，花园口站的洪峰流量不仅没有因槽蓄而削减，反而较上游站增大40%。这些高含沙洪峰通过期间的异常水位涨落现象，给防汛工作带来一系列新的问题。

(2) 水库淤积问题。在流域中上游修建水库，调节洪水，蓄水灌溉，并利用落差发电，可以起到综合利用的效果。但是，水库在蓄水的同时，也拦蓄了水流中挟带的泥沙，库容因此不断减少，日久后终于湮废失效。水库淤积范围实际上还远不止建库初期蓄水所及的地区，由于淤积上延，水库面积还会不断扩大，使更多的上游河谷受到淹没及浸没影响。

水库淤积所造成矛盾的尖锐性，还是在近二、三十年因可供建坝的地址日益减少才逐渐为人们所认识。美国水库年淤积量达到 1.2×10^9 吨。日本截至1979年止，据库容超过 10^6 米³的425座水库资料统计，泥沙淤积已侵占库容6.3%。印度在1969年统计，大于

1, 100×10^6 米³的水库共 21 座, 年库容损失率为 0.5~1.0%^[2]。由于水库淤积而带来的压力, 人们开始提出有没有可能以流域面上的工程如水土保持及中、小型水库来代替干、支流上的点的工程(枢纽工程)^[8]。

同样的问题放在多沙河流上, 情况自然又要突出和复杂得多。据陕西省初步统计, 全省百万米³以上的水库淤积量已达 512×10^6 米³, 占总库容的 15.3%; 近几年来, 新建百万米³以上水库平均每年递增库容为 260×10^6 米³, 而已成水库由于淤积平均每年递减库容 8000 多万米³, 相当当年兴建库容的三分之一^[4]。据水利部直接掌握的二十座水库观测资料, 多数水库运行不足二十年, 总淤积量已达 $7,785 \times 10^6$ 米³, 占原设计库容的 18.6% (见表 1-2)。

黄河三门峡水库兴建初期, 由于缺乏经验, 对泥沙问题估计不足, 设计规定的各种兴利指标很高。如原设计预期防洪指标, 将千年一遇的洪峰流量 $32,500$ 秒米³ 削减为 $6,000$ 秒米³; 计划装机八台发电, 总容量为 116 万千瓦; 计划灌溉 6,510 万亩; 下游航运水深不小于 1 米。为此, 确定正常高水位 360 米, 相应库容 647 亿米³, 淹没面积 3,500 公里², 移民 87 万人, 初期大坝按 350 米高程施工, 水库按 340 米水位运用。1958 年截流, 1960 年 9 月大坝基本建成。蓄水后, 水库淤积十分严重, 至 1962 年 3 月总淤积量就达 15 亿吨, 占同期入库沙量的 93%, 到 1964 年淤积量已达 44 亿吨, 且淤积末端不断向上游延伸, 威胁着关中平原和西安市的工、农业生产。此后, 被迫放弃蓄水, 将已安装好的第一台机组拆迁, 进行工程改建。这样一来, 不但兴利指标大大降低, 而且由于两次大改建, 延长工期十年; 这个教训是深刻的。

表 1-2 中国部分水库淤积情况表

序号	水库名称	河 流	控制面积 (公里 ²)	坝 高 (米)	设计库容 (亿米 ³)	统计年限	总淤积量 (亿米 ³)	淤积量占库 容百分数 (%)	备 注
1	刘家峡	黄 河	181,700	147	57.2	68~78	5.8	10.1	(335米水位时)
2	盐锅峡	黄 河	182,800	57	2.2	61~78	1.6	72.7	
3	八盘峡	黄 河	204,700	43	0.49	75~77	0.18	35.7	
4	青铜峡	黄 河	285,000	42.7	6.20	66~77	4.85	78.2	
5	三盛公	黄 河	314,000	闸坝式	0.8	61~77	0.40	50	
6	天 桥	黄 河	388,000	42	0.68	76~78	0.075	11	
7	三门峡	黄 河	688,421	106	96.4	60~78	37.6	39	
8	巴家嘴	渭 河	3,522	74	5.25	60~78	1.94	37	
9	冯家山	千 河	3,232	73	3.89	74~78	0.23	5.9	
10	黑松林	冶峪河	370	45.5	0.086	61~77	0.034	39	
11	汾 河	汾 河	5,268	60	7.0	59~77	2.60	37.1	
12	官 厅	永定河	47,600	45	22.7	53~77	5.52	24.3	
13	红 山	西辽河	24,486	31	25.6	60~77	4.75	18.5	
14	闹得海	柳 河	4,501	41.5	1.96	42	0.38	19.5	
15	冶 源	弥 河	786	23.7	1.68	59~72	0.12	7.2	
16	岗 南	漳沱河	15,900	63	15.58	60~76	2.35	15.1	
17	龚 嘴	大渡河	76,400	88	3.51	67~78	1.33	38	
18	碧 口	白龙江	27,000	101	5.21	76~78	0.28	5.4	
19	丹江口	汉 江	95,217	110	160.5	68~74	6.25	3.9	
20	新 桥	红柳河	1,327	47	2.0	14年	1.56	78	

(3) 灌溉渠系淤积问题。扩大灌溉面积是保证农业增产的主要措施之一。我国北方

气候比较干旱，灌溉需要更为迫切，但是，也正是在这个地区，河流的含沙量一般较高，在引水灌溉的同时，也引进了大量泥沙。华北大平原本是黄河的冲积三角洲，地面比较平坦，渠道设计受到坡度限制，挟沙能力一般不可能很大，渠系淤积是一个严重的问题。为了减轻灌区淤积，各国水利工作者都致力于研究如何减少入渠沙量，并取得了不少成功的经验，其中利用环流作用阻止泥沙入渠，布设沉沙池拦截入渠泥沙，更是得到广泛的应用。但在我国多沙河流上，由于挟带的泥沙特别细，在垂线上的分布比较均匀，引表层水和引底层水对于减少入渠沙量差别不大，而在进入沉沙池以后，有时又会形成异重流，降低了沉沙效果，带来了不少独特的问题。另一方面，我国劳动人民长期以来又有引洪淤灌、变淤泥为肥料的传统做法，其中有不少丰富的经验犹待系统总结。

(4) 港湾河口淤积问题。河流注入海洋以后，泥沙迅速沉淀。一遇大风高浪，滨海浅滩上的泥沙受到扰动，被举悬浮水中，在潮流、海流及沿岸流的作用下，又被带到远离河口的地区，引起港湾河口的淤积，给航运排涝造成困难。黄土地区的大量细颗粒泥沙在海滨落淤以后，发展形成规模宏伟的淤泥质海岸。淤泥物质在被风浪掀起悬浮于水中以后，即使没有外力作用，也有可能以异重流的形式运动。从海岸演变的性质上看，与砂质海岸或砾石海岸相比，有很多不相同的地方。

综上所述，由于我国北方地区很多河流含沙既多又细，在水利建设中引起了一系列的特殊矛盾，迫切需要及时开展泥沙运动的基本理论研究。再则，存在泥沙问题的部门还远不止水利建设战线。

我国西北地区散布了大片沙漠，风沙移动对农业生产及铁路交通造成很大威胁。如何固沙造林，布设沙障拦截泥沙，是关系到这个地区的生产建设的大问题。泥沙在风力吹扬作用下的运动机理与流水中的泥沙运动机理不乏相似之处。风沙运动突出了泥沙四种基本运动形式中的一种，相对说来问题比较简单，在量测工作中存在的困难也较少。

自从五十年代以来，利用管道输送固体粒状材料愈来愈得到广泛的应用。被输送的物料包括砂石、煤块、纸浆、糖浆、矿石以及其他化工原料，输送距离过去还仅限于工厂或工地范围以内，目前已有从煤矿把煤粉直接通过管路经过长距离送到发电厂的了。为了节省运输费用，近年来人们在管路中增加一定数量的极细颗粒（如粘土）或高分子聚合物，用以改变流体的粘性，就可以在高浓度条件下输送固体材料^[6]。管道中的两相流运动实际上代表了一种特定边界条件下的泥沙运动，就其运动机理来说，和河渠中的泥沙运动基本上是一致的。

流态化技术近年来得到了迅速的发展。流态化技术系通过气流或水流，将固体颗粒处于悬浮状态，以便起到混和及传热的作用。例如，矿石可以不经高炉而在流态化床中用气体还原至金属，粮食及其他植物种子可以应用这一原理进行干燥，等等。流态化技术又往往和上述管道输送物料联合应用，在石油、化工、冶金、粮食工业及原子能利用中，都占有重要的位置。显然，流态化床中固体颗粒的运动与泥沙在河流中的悬浮与沉降是有相同之处的。

环境污染是工业化国家面对的一个重要社会问题。工农业废水流入江河以后固然会改变水质，但污染问题之所以复杂，还在于这些废水污染了江河中的泥沙，使这些泥沙成为长期存在并不断积累的“污染源”。因而，在环境科学的研究中，泥沙在不同条件下的扩散

和离散过程便成了一个重要的课题。

除此以外，还有一些学科虽不以研究泥沙运动为其直接目的，但在一定程度上对泥沙运动力学的了解却是发展这些学科的必不可缺的基础知识之一。例如，地貌学主要研究地表形态在内力及外力作用下的变化过程，而其中外动力过程实质上正是反映了地表物质在重力、流水、风力、波浪及冰川作用下的侵蚀、搬运和沉积过程。不掌握在不同动力作用下物质的运动规律，就很难明了地表形态发生发展的内在机理。六十年代出版的《理论地貌学》^[6]一书中，很大一部分篇幅都是用来探讨泥沙运动问题的；拜格诺(R. A. Bagnold)在四十年代初期所著的《风沙和荒漠沙丘物理学》一书更为如何利用动力学的知识来阐明风成地貌发育过程问题树立了良好的范例^[7]。沉积相及古地理学主要通过沉积物的颗粒大小、级配、形状、圆度、方位及结构等方面的特点的分析来恢复古地理环境^[8]，这对探寻石油及天然气，以及研究地层古生物均有重要作用，而对泥沙颗粒在各种动力作用下分选过程的研究无疑也有助于深入理解各种沉积物的具体形成条件。例如，过去长期以来人们都认为沉积物的粗细交互成层现象反映了不同动力强度下的情况，但爱因斯坦(H. A. Einstein)及本书作者利用水槽试验，证明了在粒配分散广、沉积强度大的环境中，即便在恒定流的条件下，也有可能形成粗细成层的沉积物^[9]。从此，在试验室中研究沉积相问题便得到更广泛应用^[10~12]。随着模型试验技术的发展和轻质模型沙的应用，越来越有可能在实验室里对各种复杂动力条件下的沉积过程进行实验研究。沿着这个方向发展下去，有可能形成一门独立的边缘性学科——动力沉积学。泥沙运动力学还和地质地理学科中很多旁的分支学科有关。例如，作者深信，对于重矿质的运动规律的研究将会促进沙矿学的发展。看来，把泥沙运动力学作为地质地理工作者的一门基础课程已应提到日程上来加以认真考虑。本书的编写也正是为了能在这方面起到一点促进作用。

当代科学研究的发展规律表明：由于生产实践的需要，往往在不同学科之间派生出某些边缘学科或形成具有共同规律性的新的技术基础学科；对这些边缘学科或技术基础学科的研究反过来又会促进很多学科的发展。泥沙运动力学正是这样成长起来的一门新的技术学科。它虽然还很年轻，也不够成熟，但却具有蓬勃的生命力，自有其辉煌的发展远景。

第二节 学科的性质及现状

按照作者不成熟的考虑，泥沙运动力学应该是内容更广泛的“泥沙学”的一个组成部分。这样一门“泥沙学”主要包含四个方面的内容：

- (1) 泥沙的形成及性质。研究风化作用及风化产物、泥沙的颗粒特性及群体特性等。
- (2) 泥沙运动力学。研究泥沙在冲刷、搬运、沉降过程中的规律。
- (3) 泥沙的野外取样及室内试验。研究泥沙运动的量测方法及沉积物的统计取样，泥沙性质的室内分析及其表达方法，泥沙运动的水槽、风洞及模型试验等。
- (4) 应用泥沙学。研究上述三方面的知识在实际泥沙问题中的应用。

截至目前为止，还没有一本专著全面概括这四方面的内容。我国沙玉清教授撰写的《泥沙运动学引论》一书^[13]，除了涉及到模型试验及稳定渠道设计等问题以外，主要探讨的是泥沙运动力学的问题，且只限于明渠流中的泥沙运动。武汉水利电力学院编写的《河