

NISHAYANJIU JINZHAN 泥沙研究进展

王光谦 胡春宏 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

泥沙研究进展

王光谦 胡春宏 主编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

泥沙研究进展/王光谦, 胡春宏主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-4182-6

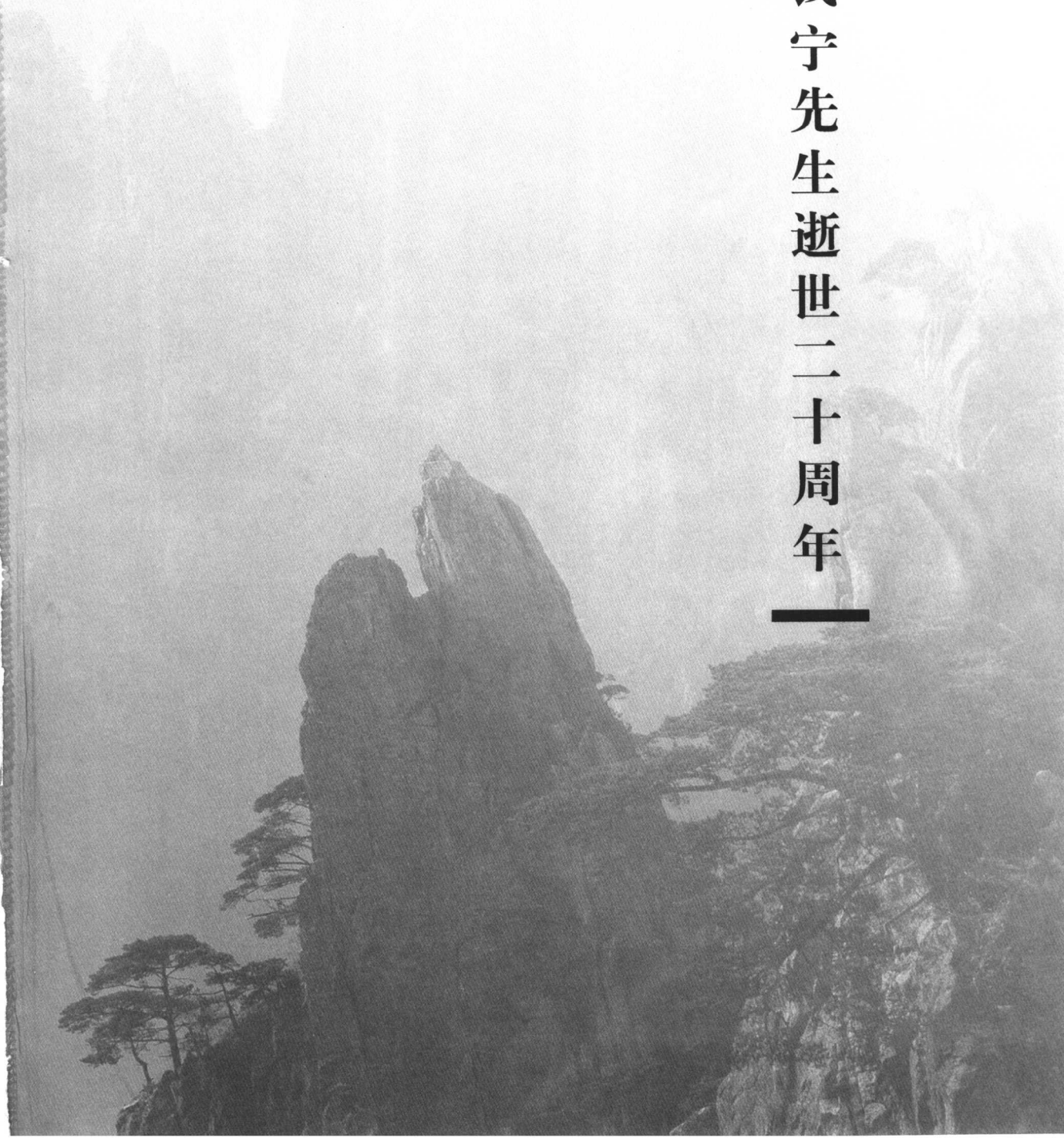
I. 泥... II. ①王... ②胡... III. 泥沙—研究—中国 IV. TV14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 145068 号

书 名	泥沙研究进展
作 者	王光谦 胡春宏 主编
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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 45.25 印张 1101 千字
版 次	2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	98.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

——纪念钱宁先生逝世二十周年——



前 言

今年是钱宁先生逝世 20 周年，我们怀念他。

钱宁先生毕生投入泥沙科学研究，为泥沙运动力学理论的完善和我国泥沙学科的发展作出了卓越贡献。作为一个科学家，无论在多么困难的条件下，钱宁先生始终如一地坚持将理论研究与实际泥沙问题的解决相结合、将科学研究与祖国水利建设的伟大事业相结合。钱宁先生为人、为学和爱国知识分子的情怀，永远是我们学习的榜样。我们缅怀钱宁先生，学习他坚持实事求是、理论联系实际的工作作风，努力将泥沙科学与祖国江河治理的伟大事业继承和发展下去。

钱宁先生虽然离去了，但是他的学术思想与贡献一天也没有离开我们。他生前编著的《泥沙运动力学》、《河床演变学》及《高含沙水流运动》始终是泥沙学科最重要的著作。自 1983 年《泥沙运动力学》出版以来，中文版先后重印 4 次，获得首届全国优秀图书一等奖；英文版《Mechanics of Sediment Transport》1999 年由美国土木工程师协会出版社出版，发行后立即成为最佳畅销书，并获《Choice》杂志 2000 年杰出学术著作奖。

20 年来，在以钱宁先生为代表的老一辈精神的引导下，国内泥沙科学与应用研究工作取得了很大的进展。为了纪念钱宁先生为泥沙事业作出的巨大贡献，推动我国泥沙研究工作的不断发展，我们编写了《泥沙研究进展》，介绍了 20 年来我国泥沙研究的主要成果。各章独立编写，分别由下述作者完成：

- 第 1 章 挟沙水流基本特性（王兴奎）
- 第 2 章 水流输沙能力（吴保生）
- 第 3 章 高含沙水流动力学（傅旭东、王光谦）
- 第 4 章 泥沙实体模型试验（邵学军）
- 第 5 章 水流泥沙数学模型研究（周建军、林秉南）
- 第 6 章 流域泥沙过程模拟（王光谦）
- 第 7 章 植被演变与侵蚀产沙的动力学过程（王兆印）
- 第 8 章 水沙流中重金属污染物的迁移扩散（倪晋仁）

第 9 章 山区河流泥沙运动 (曹叔尤、刘兴年)

第 10 章 河口泥沙运动 (窦希萍)

第 11 章 三峡水库调度优化 (李义天)

第 12 章 流域水沙配置 (胡春宏)

第 13 章 黄河泥沙研究 (张俊华、张红武)

第 14 章 长江泥沙研究 (卢金友)

本书不是对我国泥沙研究成果的全面总结,限于作者水平,不妥之处,敬请指正。

作 者

2006 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 挟沙水流基本特性	1
1.1 Einstein 推移质公式的修正	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 推移质公式的推导	1
1.1.3 卵石河床输沙率公式	4
1.1.4 公式验证	5
1.2 推移质颗粒三维运动规律	9
1.2.1 引言	9
1.2.2 PTV 技术	11
1.2.3 推移质颗粒三维运动的平均特性	14
1.2.4 推移质颗粒三维运动的紊动特性	18
1.2.5 推移质颗粒单步运动的统计规律	23
1.3 悬移质颗粒的三维运动规律	27
1.3.1 引言	27
1.3.2 颗粒三维运动的时均特性	28
1.3.3 颗粒三维运动的紊动特性	35
参考文献	43
第 2 章 水流输沙能力	46
2.1 大河流的水流输沙能力	46
2.1.1 引言	46
2.1.2 数据来源	47
2.1.3 大水深与小水深水流的泥沙输移	48
2.1.4 输沙能力研究的能量观点	49
2.1.5 大河流的输沙能力公式	51
2.1.6 与其他公式的比较	53
2.2 床沙非均匀性对输沙能力的影响	57
2.2.1 问题的提出	57
2.2.2 床沙粒径的对数正态分布	59
2.2.3 床沙非均匀性的影响	61

2.2.4	特征粒径	63
2.2.5	修正因子的检验	64
2.3	黄河的输沙能力计算	69
2.3.1	现有适用于黄河的公式概述	70
2.3.2	水流输沙能力公式的修正方法	71
2.3.3	验证分析及推荐公式	73
2.4	非均匀沙的分组输沙能力计算	74
2.4.1	引言	74
2.4.2	分组输沙能力理论	75
2.4.3	分组输沙能力计算方法	78
2.5	水流输沙能力研究的发展	86
2.5.1	不平衡输沙条件下的水流输沙能力	86
2.5.2	高含沙对水流输沙能力的影响	86
2.5.3	非均匀沙分组输沙能力	87
2.5.4	单宽水流输沙能力与点水流输沙能力	88
2.5.5	其他一些相关问题	89
参考文献		89

第3章	高含沙水流动力学	95
3.1	高含沙水流运动概述	95
3.1.1	高含沙水流的运动形式	95
3.1.2	泥沙运动机理的统一性	96
3.2	基于 Boltzmann 方程的快速颗粒流模型	98
3.2.1	引言	98
3.2.2	颗粒流的基本方程	99
3.2.3	颗粒流的本构关系	100
3.2.4	简单剪切流	102
3.2.5	颗粒流模型的验证	105
3.2.6	颗粒流模型的应用	106
3.3	基于 Boltzmann 方程的颗粒流模型的适用条件	109
3.3.1	基于 Chapman - Enskog 法的颗粒相本构关系分析	109
3.3.2	基于 Grad - 13 矩法的颗粒相本构分析	114
3.3.3	快速颗粒流本构关系的适用条件估计	116
3.4	基于颗粒运动 Lagrange 方程的 PDF 模型	117
3.4.1	基于颗粒运动 Lagrange 方程的动力学方程	118
3.4.2	动力学方程的 Chapman - Enskog 二阶近似解	123
3.4.3	颗粒相的本构关系	124
3.4.4	极限条件下的颗粒相模型	127

3.4.5	简单剪切流下的模型验证	129
3.4.6	明渠水流中的模型应用	136
	参考文献	140
第 4 章	泥沙实体模型试验	144
4.1	三峡枢纽地下电厂运行条件下的坝区淤积形态	144
4.1.1	三峡工程坝区泥沙模型的选沙及比尺设计	144
4.1.2	永久船闸引航道有、无隔流堤方案的试验	147
4.1.3	三峡工程通航建筑物总体布置(小包、大包)方案试验	151
4.1.4	三峡工程通航建筑物总体布置(全包)方案试验	153
4.2	三峡枢纽地下电厂运行条件下的坝区淤积形态	156
4.2.1	坝前淤积形态发展过程	157
4.2.2	坝前流态与地下电厂引水流量问题	158
4.2.3	上游引航道非恒定冲沙过程	160
4.2.4	考虑非恒定流过程对模型冲沙时间的修正	161
4.3	2007 年三峡蓄水位论证:重庆主城区河段河道实体模型试验	163
4.3.1	模型比尺	164
4.3.2	20 世纪 90 年代水文系列试验的主要成果	165
4.3.3	20 世纪 60 年代水文系列试验的主要成果	168
4.3.4	坝前水位优化调度方案探索性试验成果	170
	参考文献	172
第 5 章	水流泥沙数学模型研究	173
5.1	泥沙数学模型理论研究	173
5.1.1	不平衡输沙方程	173
5.1.2	三维泥沙运动的河床边界条件	174
5.1.3	简单或平面二维情况的泥沙运动的恢复饱和系数	177
5.1.4	天然河道一维的恢复饱和系数	178
5.1.5	天然河道一维数学模型计算冲淤的断面修正	180
5.1.6	理论成果的检验与验证	181
5.1.7	挟沙能力计算方法	187
5.2	一维非恒定水流及泥沙数学模型	191
5.2.1	数学模型基本框架	191
5.2.2	模型检验与验证	194
5.3	一维数学模型在三峡工程中的应用	200
5.3.1	三峡水库设计运行方案的泥沙淤积计算	201
5.3.2	三峡水库动防洪库容	204
5.3.3	三峡水库防洪调节计算	206
5.3.4	三峡水库拦洪对库区影响及问题	208

5.3.5	枝城补偿调度对城陵矶以下防洪影响和改进研究	211
5.3.6	三峡水库减淤增容优化调度研究	214
5.4	平面二维不恒定水流泥沙模型	230
5.4.1	平面二维不恒定水流、泥沙数学模型框架	230
5.4.2	数学计算方法和特殊问题处理	232
5.4.3	二维水流泥沙模型验证	233
5.4.4	二维水流泥沙模型在三峡工程的应用	239
5.4.5	二维水流泥沙模型在河道演变研究中的初步应用	247
5.5	三维水流泥沙数学模型及其初步应用	252
5.5.1	三维水流、泥沙数学模型基本方程	252
5.5.2	边界条件	256
5.5.3	方程离散和求解	256
5.5.4	坐标系统和计算网格	258
5.5.5	模型验证	259
5.5.6	三维水流泥沙模型的初步应用	264
5.6	存在问题讨论	268
5.6.1	关于挟沙能力公式的应用	269
5.6.2	数学模型在三峡应用中存在的一些问题	270
参考文献		275

第 6 章	流域泥沙过程模拟	279
6.1	研究现状	279
6.1.1	研究范围	279
6.1.2	模型现状	279
6.2	流域泥沙过程机理	280
6.2.1	黄土高原区产沙机理	280
6.2.2	模型系统框架	285
6.3	坡面产沙模型	288
6.3.1	坡面产沙模型的概化	288
6.3.2	坡面产沙计算公式	289
6.3.3	参数 m 的确定	291
6.3.4	坡面产沙模型的验证	291
6.4	河网汇流与输沙模型	293
6.4.1	精确扩散波汇流模型	294
6.4.2	沟道输沙计算	297
6.4.3	沟道水沙计算的验证	298
6.5	重力侵蚀模型	299
6.5.1	沟坡重力侵蚀物理图景概化	299

6.5.2	沟坡重力侵蚀力学分析	301
6.5.3	沟坡失稳的不确定性分析	307
6.6	流域泥沙过程模拟实例	311
6.6.1	岔巴沟流域产沙计算	311
6.6.2	黄土高原多沙粗沙区流域泥沙过程模拟	319
6.6.3	1977 年龙门—利津河段的模拟计算	329
参考文献		341

第 7 章 植被演变与侵蚀产沙的动力学过程

7.1	绪论	343
7.2	植被及其影响因素	345
7.2.1	植被与气候、土壤和人类活动的关系	345
7.2.2	植被覆盖度、植被厚度和植被活力	346
7.2.3	生态应力	347
7.2.4	植被修复、生态弹性和植被演替	348
7.3	滨河植被	349
7.3.1	滨河植被在河床演变中的作用	349
7.3.2	滨河植被调查方法	350
7.3.3	利用滨河植被研究河床演变	353
7.4	植被—侵蚀动力学	355
7.4.1	生态应力的定量表达	355
7.4.2	植被—侵蚀动力学方程组	357
7.4.3	植被—侵蚀动力学模型的应用及参数的确定	359
7.5	植被—侵蚀状态图及其应用	362
7.5.1	植被—侵蚀状态图	362
7.5.2	典型流域的植被—侵蚀状态图	364
7.6	我国主要流域植被—侵蚀动力学分析	369
7.6.1	植被—侵蚀动力学参数的经验关系	370
7.6.2	黄土高原植被—侵蚀动力学分析	374
7.6.3	长江上游地区植被—侵蚀动力学分析	379
7.6.4	华北土石山区植被—侵蚀动力学分析	382
7.6.5	南方红壤侵蚀区植被—侵蚀动力学分析	383
7.7	水土流失地区人工加速植被演替的动力学过程	384
7.7.1	造林加速植被恢复发育与土壤侵蚀变化过程	385
7.7.2	造林加速植被演替过程	386
参考文献		389

第 8 章 水沙流中重金属污染物的迁移扩散

8.1	引言	392
-----	----------	-----

8.2	试验概况	394
8.2.1	试验装置	394
8.2.2	试验用沙的性质	395
8.3	试验内容和方法	396
8.3.1	硝酸铵扩散试验	397
8.3.2	沙掺混与沙扩散试验	397
8.3.3	铜扩散试验	398
8.3.4	铜吸附速率试验	400
8.3.5	预试验和辅助试验	400
8.4	试验结果与分析	401
8.4.1	铜吸附速率实验结果和分析	401
8.4.2	不同扩散物质的扩散速度的比较	404
8.4.3	泥沙对扩散的影响	406
	参考文献	414

第9章 山区河流泥沙运动 416

9.1	山区河流泥沙问题	416
9.1.1	山区流水沙基本特性	416
9.1.2	山区河流泥沙灾害	418
9.1.3	山区河流河床演变	419
9.1.4	山区河流工程泥沙问题	421
9.2	山区河流卵石推移质运动	422
9.2.1	存在的问题	422
9.2.2	推移质运动	423
9.3	复式河槽水流泥沙特性	429
9.3.1	复式河槽阻力系数	429
9.3.2	植被作用下的复式河槽水流特性	433
9.3.3	全动床复式河槽水沙特性	437
9.4	山区河流泥沙数学模型	439
9.4.1	CRS—1 模型	440
9.4.2	模型验证计算	442

	参考文献	444
--	------	-----

第10章 河口泥沙运动 446

10.1	泥沙运动基本规律	446
10.1.1	水流作用下的泥沙起动规律	446
10.1.2	波浪作用下的泥沙起动规律	448
10.1.3	潮流和波浪的挟沙能力	452
10.2	河口全沙模型相似理论	453

10.2.1	潮流的相似条件	453
10.2.2	波浪的相似条件	454
10.2.3	悬沙的相似条件	457
10.2.4	底沙的相似条件	459
10.3	河口模型变率影响	461
10.3.1	系列变率模型设计	461
10.3.2	系列模型验证	464
10.3.3	无丁坝时模型变率影响试验	468
10.3.4	有丁坝时模型变率影响试验	470
10.4	河口泥沙数学模型	474
10.4.1	泥沙基本方程	474
10.4.2	全沙数学模型建立	475
10.4.3	模型验证	478
10.4.4	航道回淤预测及与实测对比	481
参考文献		485

第 11 章	三峡水库汛限水位优化调度	486
11.1	前言	486
11.2	三峡水库汛限水位优化调度目标分析	489
11.2.1	汛限水位优化调度目标	489
11.2.2	汛限水位优化调度方案	490
11.2.3	求解思路	492
11.3	三峡水库汛限水位优化调度的防洪限制条件	492
11.3.1	汛前推迟落水对防洪的影响	492
11.3.2	汛后提前蓄水对防洪的影响	493
11.3.3	上游建库情况下优化调度对防洪的影响	499
11.4	三峡水库汛限水位优化调度的发电效益	500
11.4.1	发电调度计算原理	500
11.4.2	汛限水位优化调度发电效益分析	502
11.4.3	上游建库情况下优化调度发电效益	503
11.5	三峡水库汛限水位优化调度对航运的影响	504
11.5.1	汛限水位优化调度对枯水期下泄流量的影响	504
11.5.2	汛限水位优化调度对变动回水区航运的影响	505
11.6	三峡水库汛限水位优化调度方案综合比选	521
11.6.1	发电效益	521
11.6.2	航运补偿	522
11.6.3	优化方案比选	523
参考文献		523

第 12 章 流域水沙配置	525
12.1 前言	525
12.2 流域水沙资源优化配置理论框架	526
12.3 流域泥沙资源系统与其他系统的关系及配置原则	527
12.3.1 流域泥沙资源系统与其他系统的关系	527
12.3.2 流域泥沙资源配置的原则与任务	529
12.4 流域泥沙资源优化配置的原理	530
12.4.1 泥沙优化配置的目标函数	530
12.4.2 多目标泥沙资源优化配置方法	532
12.4.3 流域泥沙资源配置的平衡关系	533
12.4.4 流域泥沙资源配置的机制	534
12.5 流域水沙资源联合配置的控制条件	535
12.5.1 流域水沙资源量的控制关系	535
12.5.2 流域水沙联合配置的运动输移控制方程	536
12.5.3 流域水沙联合配置的分配关系	536
12.5.4 流域水沙联合配置的工程技术条件	537
12.6 河床演变均衡稳定原理——河流熵原理	538
12.6.1 河流水力熵和统计熵	538
12.6.2 明渠流水力熵和统计熵	539
12.6.3 河流最小可用能耗率原理和统计熵	540
12.7 流域水沙资源配置措施	543
12.7.1 水力调控措施	543
12.7.2 机械挖泥配置措施	545
12.7.3 工程配置措施	546
12.7.4 流域泥沙生态配置技术	548
12.7.5 流域泥沙资源化的途径	549
12.8 流域水沙资源优化配置模型	550
12.8.1 流域水沙资源优化配置数学模型框架	550
12.8.2 河床演变均衡稳定数学模型	551
12.8.3 流域水沙资源多目标优化配置数学模型	554
12.9 流域水沙资源优化配置数学模型在黄河下游的初步应用	560
12.9.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算结果及分析	560
12.9.2 黄河下游水沙资源多目标优化配置数学模型	561
12.9.3 黄河下游水沙资源多目标优化配置模式与计算结果分析	563
参考文献	565
第 13 章 黄河泥沙研究	567
13.1 概述	567

13.2	高含沙水流的模型试验方法	568
13.2.1	模型相似条件	568
13.2.2	模型相似率验证	569
13.3	高含沙水流数学模型	576
13.3.1	准二维数学模型	576
13.3.2	模型验证计算	579
13.4	小浪底水库拦沙初期运用方式研究	580
13.4.1	实体模型概况	580
13.4.2	模型试验结果	580
13.4.3	数学模型计算结果	582
13.4.4	小浪底水库运用以来实测资料分析	585
13.5	黄河下游河床形态调整过程特点	586
13.5.1	模型概况	586
13.5.2	试验结果	586
13.5.3	数学模型预测结果	589
13.6	黄河调水调沙试验	590
13.6.1	水库异重流研究及运用	590
13.6.2	下游主槽过流能力预测技术	597
13.6.3	调水调沙对黄河下游影响预测	598
参考文献		599

第 14 章	长江泥沙研究	600
14.1	前言	600
14.2	长江水流泥沙运动规律	600
14.2.1	水流运动特性	600
14.2.2	水流挟沙力	604
14.2.3	泥沙起动规律	605
14.3	长江与洞庭湖水沙关系	606
14.3.1	江湖水沙关系变化	606
14.3.2	江湖水沙关系调整对长江和洞庭湖的影响	611
14.4	近 50 年长江中下游河道演变特点	612
14.4.1	总体河势基本稳定, 局部河势变化较大	612
14.4.2	河道总体冲淤相对平衡, 部分河段冲淤幅度较大	613
14.4.3	荆江和洞庭湖关系的调整幅度加大	613
14.4.4	人为因素的影响增强, 但未改变河道演变基本规律	615
14.4.5	坐崩(窝崩)是长江中下游岸线崩退和护岸工程崩毁的主要形式	615
14.5	水库泥沙淤积	615
14.5.1	水库泥沙淤积规律	615

14.5.2	水库变动回水区河道演变特点	620
14.6	水利枢纽坝区泥沙问题	621
14.6.1	坝区河势规划与枢纽布置	621
14.6.2	坝区河段河势及泥沙冲淤变化	623
14.6.3	通航建筑物引航道泥沙淤积及防淤和清淤措施研究	624
14.6.4	水电站的泥沙问题	626
14.7	水利枢纽下游江湖演变与影响	628
14.7.1	三峡工程建成后长江中下游江湖冲淤变化	628
14.7.2	三峡工程建成后荆江河段河道演变趋势	633
参考文献		636
回忆 Hans Albert Einstein 以及我们的共同生活		638
钱宁生平和他的著作《泥沙运动力学》		691
追求工、理、文科的融合——钱宁学术思想与教育思想概述		698

第1章 挟沙水流基本特性

1.1 Einstein 推移质公式的修正

在 Einstein 推移质输沙率公式的推导过程中,对颗粒单步步长、被举离床面的时间及颗粒上举力取绝对值等假定均与实际情况存在差异。本章假定颗粒单步步长及举离床面的时间与颗粒的性质和水流条件有关;颗粒的运动概率只与大于颗粒水下重量的那部分上举力有关。据此对 Einstein 公式进行了修正,得出的结果与大量的实测资料符合良好。

1.1.1 引言

Einstein (1942, 1950) 于 1942 年提出了输沙强度参数 Φ 与水流参数 Ψ 之间的经验关系,1950 年又推导出了严格的数学表达式, Einstein 公式在河流工程界得到了广泛的应用。为了评估 Einstein 公式的可靠性, Vanoni (1975) 采用实测资料进行计算比较后得出结论: Einstein 公式在现有的公式中是最好的,在更好的公式提出以前,泥沙工程界的工程师将一直依赖它。Ettema 和 Mutel (2004) 详细介绍了 Einstein 推移质公式的发展过程, Einstein 以力学方程描述冲积河流的复杂特性,在公式中引入了流体力学的紊流和边界层的概念及概率统计理论,此公式是河流工程学的里程碑。

在处理泥沙输移的复杂现象时, Einstein 进行了一些经验性的简化假定:

(1) 推移质颗粒运动的单步步长为与粒径成正比的常数,不受水流条件的影响,对于圆形颗粒,单步步长为颗粒直径的 100 倍。

(2) 水流从床面举离颗粒所需的特征时间正比于颗粒在静水中沉降一个颗粒直径长度的时间。

(3) 无论水流速度的脉动是正还是负,上举力始终为正。

针对 Einstein 的这些简化假定,很多学者进行了补充和修正。本章遵循 Einstein 的基本思路,对颗粒沉降、起动概率和水流作用力等进行了重新推导,得出了修正的 Einstein 公式。在长江寸滩站和岷江支流的都江堰河段具有长期的推移质观测资料,这些成果可用于修正的 Einstein 公式的验证。

1.1.2 推移质公式的推导

推移质公式推求当运动泥沙与床面泥沙的交换达到平衡,即单位时间内自单位床面上冲刷外移的泥沙数量正好与沉积下来的泥沙数量保持相等时的输沙率。

1.1.2.1 泥沙的沉积率

Einstein (1950) 假定在一定的水流条件下,河床表面比例为 P 的部分面积上的水流上举力大于泥沙颗粒的水下重量,有 $1-P$ 的面积上的上举力小于泥沙的水下重量。经过