

水 库 淤 积

韩其为 著

北 京

内 容 简 介

本书是水库淤积方面的专著,共分三篇、十五章。第一篇为水库淤积的基本现象和规律,包括非均匀悬移质不平衡输沙、水库异重流和高含沙量水流、水库淤积形态、推移质淤积、水库排沙与冲刷、淤积与回水的相互作用、变动回水区冲淤、水库淤积的平衡以及糙率及水库干容重确定等。第二篇为水库淤积控制,其中有库容淤积控制、洪水位抬高控制、变动回水区航道控制、坝前泥沙和水流控制及下游河道冲刷控制等。第三篇为水库下游河床冲淤与变形,包括冲淤的一般现象、来水来沙过程改变的作用、含沙量恢复以及河床变形等。

本书体系科学,资料丰富,机理阐述清晰,特别强调理论上的概括,很多内容涉及水库淤积前沿和相关进展,不少内容属于创新。

本书可供水库规划、管理人员,水库淤积、泥沙运动理论科研工作者和大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水库淤积/韩其为著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-010892-2

I. 水… II. 韩… III. 水库淤积 IV. TV145

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第072337号

责任编辑:杨家福/责任校对:柏连海
责任印制:刘士平/封面设计:张放

出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003年8月第一次印刷 印张:41 1/4

印数:1—3 000 字数:950 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

序

水库淤积(包括下游河床冲刷)是工程泥沙的重要内容之一,同时也涉及泥沙运动力学的一些方面,是河流动力学的一个重要部分。我国对水库泥沙淤积颇为重视,积累了大量实际资料和研究成果,但是缺乏深刻的概括,尚未形成独立的学科分支。韩其为院士多年来在这方面做了大量、深入研究,经过对已有资料及成果进行深入分析、总结和理论研究,撰写的专著《水库淤积》是很必要和及时的。

本专著体系颇为科学,界定了“水库淤积”基本内容,占有的资料丰富,分析深刻,机理阐述清楚,特别强调理论上的概括。本书有不少进展和创新,有很多内容涉及水库淤积研究的前沿,特别表现在以下几个方面。第一,在水库泥沙运动方面对于非均匀沙挟沙能力、非均匀沙不平衡输沙以及挟沙能力级配和有效床沙级配方面做了深入研究,得到了一系列理论成果,并且已用到水库淤积研究和工程泥沙实际。同时对异重流输沙、缓坡时潜入及倒灌淤积也有新的概念和成果。第二,利用非均匀悬移质不平衡输沙关系,解释了悬移质淤积时三角洲的形成,推导了它的各种形态参数和表达及后期的转化。对于锥体淤积形态,也阐述了其条件,推导了出库含沙量及库容淤积过程的简化表达式,它们能概括一些前苏联和我国研究者的成果。第三,对水库推移质淤积做了专门论述,从理论上证实了单独推移质淤积更能形成三角洲;但是与悬移质同时淤积时相互交错,就不可能形成单独的推移质三角洲。第四,对于水库变动回水区冲淤、淤积引起的水位抬高以及非均匀颗粒淤积物干容重的确定和细颗粒淤积物的密实均有理论关系。第五,对水库淤积的平衡、平衡后的冲淤和排沙以及到达平衡的过程等进行了揭示,给出了较全面的概化图形和规律表达。第六,对于水库淤积控制进行了较全面阐述,其中包括库容淤积控制的“水库长期使用”、变动回水区枯水的水深控制以及回水末端淹没控制等。特别是对于我国首创的水库长期使用,加拿大在论证三峡工程可行性报告中就有明确肯定和很高的评价:“平衡坡降和水库长期使用库容的理论在中国已经发展为一种成熟的技术,三峡工程处理全部泥沙的策略就是建立在这个基础之上。世界上没有一个国家像中国一样在水库设计中有那样多的经验,以致使调节库容和防洪库容能无限期地保持。”第七,在水库下游河道冲刷方面,提出了交换粗化的概念和模式,对水库下游挟沙能力级配表达、挟沙能力调整、河型沿程变化对挟沙能力影响以及含沙量恢复机理等在理论上有所进展和新的内容。对水库下游河道演变也做了较深入的论述。

综上所述,《水库淤积》这本专著内容颇为新颖、全面,理论概括水平颇高,已使水库淤积由定性描述在向定量表达过渡。另一方面,书中有一些探索,对促进学术研究、引导后续工作也有一定价值。总之这是一本很好的水库淤积方面的专著,对我国水库淤积研究和工程泥沙问题解决将有很大意义。

韩其为院士系自学成才。一方面他接触的实际现象、资料多,而且是作为有心人去深

入研究、分析、领会。另一方面,他在基础理论方面颇为扎实,重视数学、力学及河流动力学在泥沙运动和水库淤积方面的应用。以这两者作为基础,加上他的创造性研究和吸取他人成果的精华,在水库淤积方面汇集成本书绝不是偶然的。我与他认识40余年,自从他来我所在的学院进修之后,我们逐渐由熟识转变为深交。对本书的出版,我由衷地表示高兴。

中国工程院院士 

2003年7月20日

前 言

水库淤积是水库泥沙淤积的简称。它是工程泥沙的重要课题,也是泥沙运动力学的内容之一。中华人民共和国成立后,我国修建了大量水库,泥沙淤积已成为一个普遍问题,不仅建成的水库要面对淤积带来的各方面的负效应,就是尚未兴建的大型水库也必须对将来淤积的情况做出研究和预报,以满足可行性论证的要求。而水库淤积的各种现象又是与水库中泥沙运动包括悬移质、推移质以及浑水异重流密切联系的,并且这时的泥沙运动状态与冲积性河道和平衡条件有着相当差别,它不仅提供了在淤积条件下、同时也提供了在冲刷条件下(包括水库内冲刷和它引起的下游河道的冲刷)即不平衡程度很高时的泥沙运动现象。这些现象将引导泥沙运动理论研究的深入。事实上,正是水库淤积规律的探索,推动了非均匀悬移质不平衡输沙的研究。可见,水库淤积不仅依赖于泥沙运动理论已有成果的应用,同时也能提出和扩大泥沙运动理论研究的范畴。正因为如此,水库淤积不仅对工程泥沙有重要的实际意义,同时在泥沙运动理论方面也有很大价值。

由于我国泥沙多,而水库淤积对经济效益影响大,所以国家对泥沙研究颇为重视。首先在实际水库泥沙淤积观测方面开展了大量工作,积累了丰富资料;通过对这些资料的分析,观测、研究人员掌握了有关水库的特性,有的已在一定程度上指导其水库运用,以控制其淤积;与此同时泥沙研究人员更进一步转向研究其共同规律和理论基础。因此,水库淤积的研究在我国得到了不断发展和提高,从总体看目前在国际上已处于领先水平。

鉴于以往水库淤积作为一门学科,基本上是描述性的,为满足工程和学科需要,亟待向定量发展。加之我国的实际资料和研究具有良好基础,因此作者从20世纪60年代起即结合水库淤积的实际,不间断地进行了水库淤积规律的研究,以期将水库淤积推向一个新的阶段。为此我们先后开展了二十余个专门问题研究,涉及了水库淤积的各个方面,包括非均匀悬移质挟沙能力和不平衡输沙、水库异重流、水库淤积形态的理论基础、水库排沙、库容淤积过程、淤积与回水的相互作用、变动回水区的冲淤、水库淤积的平衡以及淤积物干容重及其变化和水库糙率确定等。其次,对水库的库容控制、淤积引起洪水抬高的控制、变动回水区的航道控制、下游河道冲刷控制等也做了不少研究。此外在下游河道冲淤和变形方面的有关问题也取得了相应的成果。本书就是在这些专题研究的基础上汇集而成的一本专著。当然,水库淤积是异常复杂的,它的内容需要不断补充和提高,理论需要不断加强;本书介绍的只是水库淤积由定性描述向定量论证过渡的一个阶段。

本书在编写过程中特别注意三点,即实际现象的描述、内在机理的揭露和规律的定量表达。对于暂时无法定量的规律也尽可能准确地描述。对于某些现象难以取得全面的实际资料,则利用经过验证、较为可靠的数学模型计算成果,以了解全过程,弥补实际资料的不足。

本书的编写早在20世纪70年代末即着手进行。当时长江水利委员会总工程师杨贤溢、长江科学院河流研究室主任唐日长、长江水利委员会水文局总工程师向治安给予了大力支持。丹江口水文总站总工程师童中均、杨克诚也给予了多方支持和协助。王玉成、向

熙珑两位高级工程师参加了本书第二、三章及十三、十四、十五章的部分资料的分析。对杨贤溢总工、唐日长主任及上述几位好友,表示衷心感谢。我到中国水利水电科学研究院后,在本书有关专题研究和书稿编写方面,院、所领导,尤其是匡尚富副院长、胡春宏所长也给了大力支持和帮助,深表感谢。由于研究的不断深化,专题研究内容不断增加,直到20世纪末才完成全部专题研究。经过最近两年的汇总和对早期写出部分的补充、修改,总算完成了本书。在20余年水库淤积研究和本书编写过程中,我的夫人何明民教授级高工自始至终给予支持和鼓励,并认真核对了全部稿件,还参加了大部分研究工作。钟正琴女士为本书的底稿打印和绘图付出了大量的劳动,特深表感谢。

武汉大学谢鉴衡院士一直支持本书的编写,对作者完成本书给予了很大的帮助和鼓励。

限于理论水平,本书的缺点和差错在所难免,敬请读者指正。

目 录

序

前言

绪论	1
0-1 水库的泥沙淤积	1
0-2 国内外水库淤积的严重性	1
0-3 水库淤积引起的问题	2
0-4 我国水库泥沙淤积研究的成就和进展	4
0-5 水库淤积的理论体系	11
0-6 本书的主要内容和进展	12
参考文献	18

第一篇 水库淤积

第一章 非均匀悬移质不平衡输沙	27
1-1 不平衡输沙现象	27
1-2 悬移质不平衡输沙的基本方程	30
1-3 非均匀沙平衡输沙的条件及挟沙能力	35
1-3-1 平衡输沙的条件及挟沙能力基本关系	35
1-3-2 不同输沙状态挟沙能力讨论	37
1-3-3 实用的挟沙能力公式	40
1-4 含沙量沿程变化	43
1-4-1 不平衡输沙基本方程简化	43
1-4-2 恢复饱和系数	43
1-4-3 均匀沙含沙量沿程变化规律	47
1-4-4 非均匀沙含沙量沿程变化规律	50
1-5 悬移质级配变化的规律	55
1-5-1 悬移质级配变化的一般方程	55
1-5-2 淤积时悬移质级配的分选	57
1-5-3 明显冲刷时悬移质级配的变化	62
1-5-4 微冲微淤下悬移质级配的变化	65
1-6 床沙级配变化规律	67
1-6-1 明显淤积时床沙级配的变化	67
1-6-2 明显冲刷时床沙级配的变化	69
1-7 床沙质与冲泻质划分问题	70

1-7-1	床沙质与冲泻质具有统一的挟沙能力规律	71
1-7-2	床沙质与冲泻质应同时处于饱和或非饱和	77
1-7-3	划分床沙质与冲泻质是否必要	79
	参考文献	81
第二章	水库异重流及高含沙量水流	83
2-1	水库异重流	83
2-1-1	水库异重流的现象	83
2-1-2	异重流的稳定流动	85
2-1-3	水库异重流的形成及潜人和持续的条件	88
2-1-4	异重流的输沙规律	95
2-2	异重流淤积与排沙	100
2-2-1	异重流的淤积	100
2-2-2	异重流的排沙	105
2-3	异重流的倒灌及淤积	108
2-3-1	倒灌异重流形成	108
2-3-2	倒灌异重流流量沿程衰减	110
2-3-3	异重流倒灌长度	111
2-3-4	倒灌异重流含沙量沿程变化及淤积	113
2-3-5	淤积厚度沿程分布	115
2-4	水库高含沙水流	117
2-4-1	高含沙水流的特性	117
2-4-2	流动特性	119
2-4-3	输沙特性	120
2-4-4	高含沙紊流的挟沙能力	121
2-4-5	高含沙水流在水库淤积中的作用和利用问题	124
	参考文献	129
第三章	水库淤积形态	131
3-1	水库淤积形态的分类及表示方法	131
3-1-1	水库淤积形态的分类及特性	131
3-1-2	水库淤积形态的纵向表示方法	132
3-2	水库三角洲淤积	141
3-2-1	水库淤积的三角洲趋向性	141
3-2-2	三角洲的形态特征	149
3-3	三角洲推进及形成条件	159
3-3-1	三角洲的推进	159
3-3-2	三角洲的形成条件	160
3-4	锥体淤积	167

3-4-1	明流时锥体淤积	168
3-4-2	浑水水库的锥体淤积	177
3-4-3	异重流倒灌时形成的倒锥体	178
3-5	带状淤积体及三种淤积形态的相互转化	178
3-5-1	带状淤积体	179
3-5-2	三种淤积体的相互转化	183
3-6	水库淤积横剖面	185
3-6-1	单纯淤积	185
3-6-2	冲淤交替后的横断面形态	187
	参考文献	188
第四章	推移质淤积	190
4-1	推移质稳定不平衡输沙	190
4-1-1	推移质稳定不平衡输沙方程	190
4-1-2	不平衡输沙方程的解	194
4-2	推移质输沙能力	197
4-2-1	非均匀沙低输沙率公式	197
4-2-2	非均匀沙输沙率的结构式	201
4-3	推移质淤积现象	210
4-3-1	推移质的易淤性	211
4-3-2	推移质淤积的纵向形态	211
4-3-3	淤积过程中的分选	213
4-3-4	悬移质向推移质的转化	214
4-3-5	推移质淤积的横向分布	217
4-3-6	淤积与冲刷的交错性	217
4-4	推移质单独淤积的三角洲趋向性及淤积的纵剖面	217
4-4-1	推移质单独淤积的三角洲趋向性	217
4-4-2	推移质单独淤积的三角洲形成的分析	223
4-4-3	非均匀沙及不平衡输沙对于三角洲形成的影响	225
4-4-4	推移质淤积三角洲的确定	229
4-5	悬移质淤积平衡后推移质淤积纵剖面	233
4-5-1	粗颗粒泥沙起动流速	234
4-5-2	满足河相关系时起动平衡纵剖面	235
4-5-3	河宽沿程不变时起动平衡纵剖面	239
4-5-4	推移质淤积数量及过程	241
4-5-5	坝前水位变化大时的淤积纵剖面	244
4-6	水库淤积过程中推移质与悬移质交错淤积的纵剖面	247
4-6-1	交错淤积时推移质淤积纵剖面	247

4-6-2 推移质淤积两阶段的叠加	255
参考文献	258
第五章 水库排沙与冲刷	260
5-1 壅水排沙	260
5-1-1 壅水排沙的控制方程	260
5-1-2 壅水排沙时出库含沙量、拦沙率与排沙比	263
5-2 水库溯源冲刷	272
5-2-1 剖面为直线时的溯源冲刷	275
5-2-2 纵剖面为曲线时的溯源冲刷	281
5-2-3 水位连续下降的溯源冲刷	288
5-2-4 冲刷剖面为高次多项式时的溯源冲刷	291
5-2-5 溯源冲刷纵剖面的偏微方程求解	297
5-3 敞泄排沙	305
5-3-1 敞泄排沙已有的研究	305
5-3-2 敞泄排沙的机理及主要方程	306
5-3-3 敞泄排沙的简化公式	309
5-3-4 敞泄排沙的挟沙能力公式	313
参考文献	315
第六章 淤积与回水的相互作用	317
6-1 回水曲线方程的积分及特性	318
6-1-1 回水曲线方程及其积分	318
6-1-2 回水曲线的特性	322
6-1-3 回水末端	325
6-2 淤积引起的回水抬高	327
6-2-1 淤积引起的回水抬高的一般特性	327
6-2-2 淤积引起回水抬高的例子	334
6-3 对淤积抬高回水其它问题的讨论	338
6-3-1 糙率变化时水位的抬高	338
6-3-2 流量变化时淤积引起的回水抬高	340
6-3-3 坝前水位升降时淤积引起的回水抬高	341
参考文献	342
第七章 变动回水区冲淤	344
7-1 变动回水区的冲淤条件	344
7-1-1 变动回水区的回水影响	344
7-1-2 壅水程度对滩槽流速分布的影响	347
7-2 变动回水区的淤积特点	350
7-2-1 卵石推移质淤积段特点	351

7-2-2	粗沙、砾石推移质淤积段的特点	355
7-2-3	中、细沙推移质淤积段特点	357
7-2-4	悬移质淤积段特点	359
7-3	消落冲刷与充水冲淤	359
7-3-1	充水冲刷与充水淤积	360
7-3-2	消落冲刷	362
7-4	变动回水区河势特点及河型转化	369
7-4-1	变动回水区河势特点	369
7-4-2	河型转化	374
	参考文献	376
第八章	水库淤积的平衡	377
8-1	水库淤积的相对平衡及由空库至平衡的淤积过程	377
8-1-1	水库淤积的相对平衡	377
8-1-2	由空库至平衡时其它因素变化	381
8-2	水库淤积初步平衡后水库泥沙运动及冲淤的特点	385
8-2-1	初步平衡后水库的继续淤积及冲淤变化机理	385
8-2-2	径流水库年内冲淤	386
8-2-3	具有防洪目标的水库的年内冲淤	388
8-2-4	淤积初步平衡后水库对含沙量的调整	389
8-3	悬移质相对平衡纵、横剖面及第一、二造床流量	391
8-3-1	水库的造床特点	391
8-3-2	悬移质相对平衡纵剖面及第一造床流量	394
8-3-3	河槽相对平衡横剖面及第二造床流量	398
8-4	最终保留库容和淤积量及淤积过程	401
8-4-1	最终保留库容	401
8-4-2	总库容及概化关系	404
8-4-3	槽库容淤积过程	406
8-5	滩库容淤积过程	407
8-5-1	滩库容近似分布	407
8-5-2	滩库容淤积过程	409
	参考文献	412
第九章	糙率及干容重确定	414
9-1	淤积物的干容重及其变化	414
9-1-1	淤积物初期干容重	415
9-1-2	淤积物稳定干容重	418
9-1-3	淤积物密实及干容重变化	419
9-1-4	粗、细沙混合时淤积物(或床沙)干容重	427
9-1-5	水库淤积物密实的计算	431
9-2	水库淤积与河道冲刷时糙率的确定	433

9-2-1	水库蓄水后淤积前的糙率	433
9-2-2	水库淤积平衡后的糙率确定	441
9-2-3	淤积与冲刷过程中糙率的变化	455
参考文献		458

第二篇 水库淤积控制

第十章	水库淤积控制	461
10-1	淤积引起的回水位抬高控制	461
10-1-1	淤积引起的回水位抬高将增加淹没	461
10-1-2	淤积引起回水位抬高的确定	462
10-1-3	洪水位抬高的控制	468
10-2	坝前区泥沙淤积与水流条件控制	470
10-2-1	坝区河势控制	470
10-2-2	排沙和排泄异重流设施	472
10-2-3	水轮机及其它引水口的防沙	474
10-2-4	坝区通航建筑物泥沙淤积及水流控制	478
10-3	水库对下游河道冲淤的控制	481
10-3-1	下游河道减淤控制	481
10-3-2	下游河道冲刷数量的控制	483
10-3-3	下游河道造床流量变化及人造洪峰的作用	485
10-3-4	水库拦粗排细的作用	486
参考文献		487
第十一章	水库长期使用	489
11-1	水库淤积控制的发展过程和水库长期使用的提出	489
11-2	水库长期使用的原理、可行性及合理性	491
11-2-1	长期使用的原理	491
11-2-2	水库长期使用在技术上的可行性	493
11-2-3	水库长期使用在经济上的合理性	496
11-3	长期使用水库的保留库容	498
11-3-1	淤积末端在正常蓄水位以下时水库横剖面保留面积及保留库容	499
11-3-2	淤积末端在正常蓄水位以上时水库横剖面保留面积及保留库容	502
11-4	推移质淤积	503
11-4-1	悬移质下段淤积长度未知	503
11-4-2	悬移质下段淤积长度已知	505
11-5	三峡水库长期使用分析	506
11-5-1	平衡坡降及第一造床流量的确定	506
11-5-2	第二造床流量及平衡时断面形态的确定	508

11-5-3	淤积及保留库容的确定	509
11-5-4	悬移质淤积过程的计算	511
11-5-5	推移质淤积纵剖面及过程	512
参考文献.....		514
第十二章	水库航道控制.....	516
12-1	水库的航运问题	516
12-1-1	水库变动回水区航道的改善	516
12-1-2	变动回水区航道存在的问题	517
12-2	变动回水区航道改善及河段碍航原因的分析	520
12-2-1	建库后水库变动回水区的航道从全局看有所改善	520
12-2-2	变动回水区出现个别碍航点的原因	520
12-2-3	变动回水区碍航浅滩的性质及碍航程度与淤积物组成有明显关系	521
12-2-4	影响变动回水区航道的决定性因素——水库运用方式	522
12-3	变动回水区航道控制	523
12-3-1	变动回水区航道控制调度	524
12-3-2	航运控制水位的确定	527
参考文献.....		529

第三篇 坝下游河床演变

第十三章	水库下游河床演变的基本现象和水沙过程改变对河床变形的影响.....	533
13-1	水库下游河床变形的基本现象	533
13-1-1	下游河床的冲淤	533
13-1-2	下游河道冲淤过程中床沙的粗细化现象	539
13-1-3	下游河床变形特点	544
13-1-4	水力因素变化	549
13-2	水沙过程的改变对下游河道的作用	552
13-2-1	来水过程改变对河床演变的作用	552
13-2-2	来沙过程的改变对河床演变的作用	558
13-2-3	河床边界条件的变化及其对河床演变的影响	560
参考文献.....		561
第十四章	水库下游河道含沙量恢复.....	563
14-1	水库下游河道冲刷及含沙量恢复的机理	564
14-1-1	水库下泄低含沙水流引起下游河道冲刷	564
14-1-2	泥沙沿程变细引起冲刷分析	566
14-1-3	水力因素沿程增加时引起的冲刷	566
14-1-4	水力因素沿程有所减弱时床沙变细导致的冲刷	567
14-2	冲刷过程中挟沙能力的调整	568

14-2-1	冲刷过程中挟沙能力调整概述	568
14-2-2	挟沙能力级配及有效床沙级配的表达	573
14-2-3	挟沙能力级配公式的近似应用及有关问题讨论	579
14-3	挟沙能力沿程变化及调整	582
14-3-1	河型、河性沿程改变引起的挟沙能力沿程变化	582
14-3-2	前期冲刷引起挟沙能力的沿程变化	588
14-3-3	床沙级配沿程变化引起挟沙能力的变化	595
14-3-4	含沙量沿程恢复计算应注意的问题	602
	参考文献	607
第十五章	水库下泄清水期间下游河床变形特点和机理	608
15-1	床面形态特征	608
15-1-1	局部推移质淤积三角洲	609
15-1-2	带状沙垄与新月形沙垄	611
15-2	洲滩的演变	613
15-2-1	河漫滩及江心洲的演变特点	613
15-2-2	江心滩演变的特点	613
15-2-3	边滩演变的特点	620
15-2-4	浅滩演变的特点	621
15-3	主槽演变	622
15-3-1	挟沙能力调整	623
15-3-2	横断面形态调整	623
15-3-3	纵剖面形态的调整	625
15-3-4	曲率半径的调整	626
15-4	河床变形特点	626
15-4-1	分汊河型	626
15-4-2	顺直(微曲)型河道演变特点	631
15-4-3	弯曲河型演变特点	632
15-5	河型转化问题	634
15-5-1	不同河型转化的可能性	635
15-5-2	研究河型转化应注意的几个问题	637
15-5-3	河型转化分析的实例	640
	参考文献	642

绪 论

0-1 水库的泥沙淤积

河流上修建水库后,库内即发生淤积。大量的资料表明,不论大、中、小型水库,在含沙量不是很高的条件下,只要水库有所蓄水,坝前水位有所升高,便会发生泥沙的大量淤积。产生淤积的实质,显然是由于水位升高,过水面积加大,流速减缓,从而使挟沙能力降低所致。

由于挟沙能力与流速的高次方成比例,因此过水面积的些许改变,常引起挟沙能力大幅度变化。如果泥沙组成均匀,若横断面为梯形,边坡系数为5,原河道水深 h_0 与底宽 b 之比为 $1/100$,则当水深加大1倍时,挟沙能力只有原来的 $1/17.7$;而当水深加大2倍时,则挟沙能力只有原来的 $1/98.6$ 。可见,由于水位的壅高,水力因素的减弱幅度是很大的,这便是只要水库有所蓄水,库内即产生大量淤积的原因。

当然,实际的泥沙组成是不均匀的,由于淤积,悬移质级配就会逐渐变细,致使平均流速减小,这反过来就限制了挟沙能力进一步降低,这是问题的一个方面。问题的另一方面是,即使令坝前挟沙能力非常小,但是由于在淤积过程中含沙量常大于挟沙能力(所谓超饱和和输沙),所以出库含沙量仍有一定数量,因此对于大河上的水库,要使泥沙全部淤下,而下泄清水也是很难的。显然,水库水位壅高,流速减小降低挟沙能力是主导方面,而流速减小加大挟沙能力和淤积时的超饱和输沙则是派生的,因此这两方面的影响是不可能抵消的,故而水库总是淤积的。反之泥沙全部淤下也是很难的。

从上述分析可见,水库中的悬移质淤积,涉及泥沙粗细变化引起的挟沙能力调整以及不平衡输沙的影响,其现象是很复杂的,这是一方面。另一方面随着时间变化,导致淤积的发展,水库地形改变也会影响到挟沙能力和含沙量变化,加之异重流产生和运行等,使水库悬移质淤积异常复杂。此外还有推移质淤积,以及淤积引起的水位抬高和抬高的水位引起的再淤积等,增加了水库淤积研究的难度。从学科发展而言,以往的水库泥沙淤积基本属于描述性阶段。

0-2 国内外水库淤积的严重性

大约在20世纪20年代以后,由于综合利用水库大量修建,水库淤积问题逐渐显得严重。美国^[1]在20年代以后开始修建的综合利用水库总库容为 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$,每年淤积损失 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中1935年以前兴建的水库中,完全淤废的占10%,损失库容 $3/4 \sim 1/2$ 的占14%,损失库容 $1/2 \sim 1/4$ 的占33%。

日本河流较短,坡降较大,含沙量虽不大,但由于库容一般较小,淤积速率仍较快。据统计^[1](1912~1972年),库容大于 10^6 m^3 、坝高15m以上的水库265处,已平均损失库容

20.63%,有5座水库已淤满。

至于气候干旱、暴雨强度大、水土流失较严重的国家和地区,水库淤积尤其严重。例如,据前苏联41座中亚地区灌溉及发电水库统计^[1],坝高6m以下的灌溉水库,淤满年限为1~3年,坝高7~30m的发电、灌溉水库,淤满年限为3~13年。再如,据1960年统计,阿尔及利亚的大型水库库容损失率(年淤量比总库容)约为1.2%,中型水库(库容 $0.1 \times 10^8 \sim 0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$)库容损失率为1.8%。据1969年统计,印度^[1]大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水库共21座,总蓄水量为 $1260 \times 10^8 \text{ m}^3$,库容损失率平均为0.5%~1.0%,有的可达2.0%。

我国在历史上主要发展堰塘和灌溉引水,兴建大中型水库的历史较短,除东北少数水库外,中华人民共和国成立前基本上是空白。成立后我国人民发扬自力更生、艰苦奋斗的精神,到1972年,全国已建成^[2]坝高在15m以上的水库12517座,其中库容大于 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大型水库254座, $1000 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的中型水库1307座,库容在 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下的小型水库10956座。由于我国黄河流域和北方一些河流含沙量很高,水库淤积颇为严重。特别是20世纪50年代和60年代初期运用的水库,由于缺乏控制淤积的经验,尤其如此。例如山西对全省43座大、中型水库进行统计^[3],水库总库容为 $22.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,到1974年已损失31.5%,即损失 $7 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均每年损失 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据陕西省1973年统计^[4],全省 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上水库192座,总库容 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$,已损失31.6%,即损失 $4.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中1970年以前建成的120座水库已损失其库容53.3%,有43座水库完全被淤满。

0-3 水库淤积引起的问题

水库发生淤积后,不仅会明显地影响其效益的发挥,而且会产生一些新的问题,因此水库淤积对国民经济建设、全面建设小康社会有一定影响,所以深入了解水库淤积引起的各种问题是很有需要的。

水库淤积引起的问题,可概括为六个方面。

(1) 由于淤积使兴利库容和防洪库容不断损失,导致水库综合效益降低。水库综合效益,在很大程度上决定于兴利库容和防洪库容。它们的损失,将使防洪、发电、通航、灌溉以及养殖等效益的发挥大受限制,其中的某些甚至丧失殆尽。例如山西镇子梁水库^[5]到1972年汛期,已损失库容60%,灌溉面积减少一半,使水库防洪标准从百年一遇的洪水降低到二十年一遇的洪水。宁夏青铜峡水库^[6]初期运用仅5年,就损失库容86.9%,水库调蓄能力大为降低,灌溉用水和发电备用水量都感到不足。马莲水库^[7]1958年兴建,库容 $680 \times 10^4 \text{ m}^3$,由于淤积库容损失太快,1958~1967年平均年淤积 $92.64 \times 10^4 \text{ m}^3$,曾于1965年和1975年两次加高大坝共5m,使库容达 $2047 \times 10^4 \text{ m}^3$,从而弥补了损失。

(2) 淤积上延引起淹没与浸没。泥沙淤积的结果,加大了水库的坡降,使库内水位不断抬高,因而使回水和它引起的再淤积不断上延,即出现水库淤积“翘尾巴”现象。这就使库内水位普遍抬高,从而引起对城市、工厂、矿山、农田的淹没以及对农田的浸没;例如内蒙三盛公枢纽^[8],由于泥沙淤积,水库回水范围由1962年的30km发展到1971年的43km以上。山西镇子梁水库,运用以来由于淤积上延多次追加对淹没、浸没的赔偿,总额达水库建设投资的1.8倍^[5]。另一方面,如果要控制“翘尾巴”,减少淹没和浸没,就必须降低坝前水位。例如为了避免对西安的影响以及对关中平原的淹没与浸没,必须限制三门峡水库的

潼关高程,从而必须限制坝前水位。

(3) 变动回水区冲淤对航运的影响。水库兴建后,在常年回水区由于水深加大和流速减低,航运条件有明显的改善。在变动回水区,由于边界为淤积物,河床可塑性增加,加之坡降有所减缓,滩槽差加大,水流较为平顺,深度有所增加,从全局看航道有所改善。但是从局部看,航运条件则可能有所恶化,具体说,有两种情况:一种是由于淤积改变了河势,可能使利于通航的原来的航道淤没,而新的主流部分由于基岩出露等而不利航运;另一种是,当在坝前水位消落期间,变动回水区逐渐恢复河道特性,伴随着自上而下的冲刷淤积物的现象,并且随着水位下降,冲刷不断向下游发展,类似滚雪球,冲刷量愈来愈大。当水位下降快、河底冲刷慢时,就会出现航深不够的现象,这是问题的一个方面。另一方面是,靠近这种冲刷的下游河段,由于受壅水影响,又会急剧淤积,在某些条件下(如库段开阔顺直)可使航槽摆动游荡,也会发生碍航,甚至更为严重,例如丹江口水库就曾因此发生过海损事故^[9]。

(4) 坝前泥沙问题,即坝前的建筑物包括船闸和引航道、水轮机进口、渠道引水口等都有一个泥沙问题。泥沙(特别是粗颗粒)进入水轮机会引起磨损,水草进入拦污栅则会造成堵塞^[10],从而都会增加停机抢修和降低出力;例如盐锅峡水库^[10]在刘家峡水库投入运用以前,由于拦污栅堵塞,形成停机 and 降低出力而造成损失。粗、中沙进入渠道,则会发生淤积,影响输水能力;但是粉沙和土粒如能通过渠道被带至农田淤灌,则会增加土壤的肥分^[11]。船闸和引航道如布置不当使水流条件恶化,影响航行安全,或使引航道内产生大量淤积,必须冲沙和清淤,否则船闸难以正常运转。这方面葛洲坝水库有成功的经验^[12]。

(5) 坝下游河床变形。水库蓄水后,由于库内淤积下泄含沙量常常很低,甚至下泄清水,从而引起下游河道长距离冲刷^[13,14],使水位逐渐降低,河势有所改变,河型也可能发生转化^[15]。水位降低对防洪有好处,但河势改变可能形成一些新的险工,有不利影响。在下游河道冲刷过程中,由于水库调节,枯水流量加大,航深加大,中水河势较稳定,这些对航运是有利的。但是由于流量调节,浅滩高程会有所变化,另外也可能会出现新的浅滩,值得重视。此外泄洪后,如果闸门关闭快,水流与河势不相适应,在航道恢复以前增加航运困难,甚至出现航深不够的现象,例如丹江口水库下游汉江就出现过这种现象^[16]。如果枯水流量调节不大,坝下游冲刷常使枯水位降低,有时可能使两岸已有引水建筑物高程不够。

当下游河道经过长期冲刷之后,随着水库下泄含沙量不断恢复,加之前期冲刷使河道的挟沙能力降低,则下游河道又会发生淤积^[17]。除系统淤积外,由于下泄水沙过程彼此不相适应,又会产生冲淤交替变化。这些又在不同程度上引起水位回升,河势变化,甚至也有使河型发生转化的可能等,从而对航运、防洪产生一些影响。

此外如果水库引水过多,下泄流量大幅度减小,导致输沙能力大幅度降低,此时如有支流来沙较多,往往使以下河道产生淤积而不是冲刷。一些灌溉水库下游河床有时会出这种情况。

(6) 水库淤积既可能加强水的自净能力,也同时加重水库污染。由于悬移质泥沙表面常吸附大量污染物质,在河道的情况下被水流带走,水库蓄水后,由于泥沙淤积,污染物质则在库内积累,虽然使下泄水水质可能有所改善,但是库内污染水生物甚至可能影响人类身体健康。

0-4 我国水库泥沙淤积研究的成就和进展

尽管我国水库大量兴建是中华人民共和国成立以后的事,历史不算长,但是由于多沙河流多,水库淤积问题既多,影响又大,国家颇为重视。经广大科技人员和水库管理、测量人员努力,在水库淤积研究方面我国做了大量工作,取得了很多成果,有不少贡献和进展,其中某些方面属于首创。

实际水库淤积资料的观测和收集是水库淤积研究的基础。在中华人民共和国成立初期,即20世纪50年代投入运用的永定河官厅水库、60年代初开始观测的黄河三门峡水库、汉江丹江口水库是我国最早开展系统泥沙淤积观测,而且积累了大量资料的典型。从60年代开始,水利部科技司针对黄河流域和北方多沙河流的水库淤积,确定了官厅、三门峡等12座大型水库作为重点淤积观测的水库,并建立了“黄河泥沙研究协调小组”,组织了攻关研究和成果交流。后来又根据南方水库的泥沙问题将其扩展到20个大型水库,其中包括丹江口、葛洲坝等南方水库。以这20个水库为骨干,我国已有一支数量较大的水库淤积观测队伍,收集了大量第一性资料。不论从收集资料的数量、内容、深度和可靠性看,这在世界上都是首屈一指的。需要指出的是,前水利部科技司司长戴定忠,经过数十年努力,在这方面发挥了积极的组织作用,退休后仍然念念不忘。

在水库淤积观测的基础上,水利和泥沙专业方面的科技人员和观测人员,结合具体水库,对这些资料进行了深入分析,并将结果予以应用,以改造和控制本水库的淤积。中国水利水电科学研究院(前身为水利水电科学研究院)的一些研究人员最早对官厅、三门峡、刘家峡、青铜峡、三盛公等水库进行了基础性研究。有关单位对一些水库作了较深入研究,其成果有一定应用的有下述主要例子,如山西省对镇子梁水库^[5],内蒙黄河工程管理局对三盛公水库^[8],辽宁省水利科学研究所、闹德海水库管理局对闹德海水库^[18],红领巾水库管理所、内蒙古水利勘测设计院对红领巾水库^[19],华国祥、王敏生、白荣隆、彭润泽等对龚嘴水库^[20],张振秋、杜国翰对以礼河水库^[21],曹叔尤、张新平对东峡水库^[22],黄德胜对平定河水库^[23],陈景梁、赵克玉对南秦水库^[24],焦恩泽对巴家嘴水库^[25],山西翼城县小河口水库灌区等对小河口水库^[26],水电四局(吕秀珍、彭润泽、侯晖昌、冯启德)、中国水利水电科学研究院(杜国翰、彭润泽、蒋如琴、黄永健)以及刘家峡水力发电厂等对刘家峡水库(淤积和异重流排沙^[27]),张崇山、唐仲元等对红旗水库^[28],赵克玉、陈义琦等对二龙山水库^[29],姜乃森、曹文洪等对潘家口水库^[30],夏迈定、程永华等对黑松林水库^[31],金宝琛、王立强等对白石水库^[32],陈洪升对栖霞山丘陵区的一些水库^[33]等的研究。特别是范家骅、吴德一、姜乃森、焦恩泽、彭润泽等对官厅水库^[34],钱宁、麦乔威、方宗岱、范家骅、张启舜、龙毓骞、李葆如、涂启华、张浩、夏震寰、姜乃森、焦恩泽、曹汝轩、王仕强、万兆惠、陈枝霖、李世荣、张红武、王崇浩、郭庆超、曲少军、张俊华等对三门峡水库^[35,36],韩其为、童中均、杨克诚、王玉成、向熙琬、王荣新、王维国等对丹江口水库^[37,38]的淤积等均有大量研究成果。

水库淤积是水库泥沙运动的结果,因此研究水库淤积是以泥沙运动基本理论为基础和手段。我国泥沙运动方面的一些专著,如武汉水利电力学院(张瑞瑾主编)的《河流动力学》^[39]、沙玉清的《泥沙运动力学》^[40]、钱宁和万兆惠的《泥沙运动力学》^[41]、张瑞瑾和谢鉴衡等的《河流泥沙动力学》^[42]、窦国仁的《泥沙运动理论》^[43]、侯晖昌的《河流动力学基本问

题》^[44]、韩其为和何明民的《泥沙运动统计理论》^[45]等专著对水库淤积理论研究的一些方面有重要的指导意义。

从水库泥沙运动的实际考虑,除悬移质挟沙能力外,悬移质不平衡输沙,特别是非均匀不平衡输沙规律才是水库淤积中最普遍的规律,它规定和制约了水库淤积的各种现象。由于这一部分研究对水库淤积十分重要,我们将用稍多的文字提及。国内外在均匀流、均匀沙条件下,通过求解二维(立面二维)扩散方程研究悬移质不平衡输沙的文献基本上是从20世纪60年代开始的,这方面可见文献[46]的综述。国内张启舜^[47]、侯昌辉^[48]在这方面也取得了一定进展。后来国内也出现了方程的数字解。但是由于二维扩散方程求解受制于难以可靠确定的边界条件,故结果与实际颇难符合。事实上文献[46]曾将这种求解的边界条件归纳为六种,彼此差别是很大的。其解多为无穷级数和数字解,因果关系不够简明,用起来受到限制。除张启舜的研究有所尝试^[49]外,这些结果基本上未在水库淤积中应用。从实用出发,前苏联一些学者从20世纪30年代开始就直接从沙量平衡出发,建立一维不平衡输沙方程,其中有代表性的有20世纪50年代末60年代初的П. В. Михеев^[50]、А. Б. Караушев^[51]等。稍后我国窦国仁^[52]也提出了类似的方程。И. ф. Карасев^[53]则提出了包括黏土颗粒的不平衡输沙方程。这些研究成果虽然抓住了不平衡输沙的主要矛盾,方程简明,是其优点,但是由于限于均匀沙和均匀流难以符合水库悬移质运动的实际,且理论上没有和悬沙运动的扩散方程联系起来。韩其为针对实际非均匀沙和非均匀流首次通过积分二维扩散方程得到了一维非均匀沙不平衡输沙方程^[54,55],并且当其为均匀沙和均匀流时与前述苏联学者和窦国仁公式的形式完全一致,从而给出了一维扩散方程的根据。由于是非均匀沙,他除给出了非均匀流条件下含沙量变化公式外,还给出了明显淤积与明显冲刷条件下悬移质级配变化与床沙级配变化方程。后来又进一步利用悬沙与床沙交换的统计理论^[45],给出了二维扩散方程的一般边界条件,并与已得到的一维不平衡输沙方程的结果完全一致^[56,46],同时还能给出有关参数的表达式。在积分一维不平衡输沙方程方面还有王静远、朱启贤等研究的级数解^[57]。韩其为^[55,58,59]还首次提出了挟沙能力级配及有效床沙级配的概念和详细的表达式。何明民、韩其为后来又对此做了进一步阐述^[60,61]。这对非均匀沙的不平衡输沙是必须的。后来,李义天、窦国仁、黄煜龄对挟沙能力级配概念表示认同,但提出了较为简单的一些表达式^[62,63,64]。一维不平衡输沙方程中的恢复饱和系数 α 究竟取什么样的值,存在着一些争议。限于边界条件,一些二维扩散方程求解的结果得出的恢复饱和系数 α 大都大于1^[49],由同样边界条件导出的平衡条件下的恢复饱和系数亦如此^[60]。卡拉乌谢夫给出的值大于1^[51];窦国仁认为 α 为沉降概率,其值小于1^[52];从符合实际资料看, α 基本上均小于或等于1。故文献[55]建议,淤积时 α 取值0.25,冲刷取1。目前有不少数学模型均采用这组数据。但是对黄河下游,一些研究者有采用恢复饱和系数 ≤ 0.01 ^[65]的。周建军仍采用张启舜结果,但认为小于1是由于断面不是二维,而有滩槽的问题^[66]。可见他的看法是,恢复饱和系数小于1并不是扩散本身和边界条件引起,这与一般的概念是不同的。韩其为由床面泥沙交换的统计理论给出的二维扩散方程的一般边界条件^[46]求得的恢复饱和系数既可能大于1,又可能小于1^[67],但是对于实际可能出现的条件它基本小于1,而且在一些条件下与黄河下游的 ≤ 0.01 的经验数据接近,在平衡条件下其平均值约为0.5,与他得出的前述经验结果0.25~1定性上符合。

在水库异重流方面,范家骅、吴德一、焦恩泽等于20世纪50年代联系到官厅水库观测

和室内试验,做了较深入的研究^[68],特别是给出了异重流的潜入条件和异重流排沙和孔口出流计算方法。对水库异重流的潜入条件,韩其为认为需要补充均匀流的条件^[69],即潜入点的水深必须大于异重流正常水深,否则潜入不成功;他认为异重流挟沙能力及不平衡输沙规律与明流的完全一致,但是其水力因素应由异重流部分确定^[69],并且证明了水库异重流是超饱和输沙,因而沿程淤积是必然的^[69,70]。吴德一^[71]提出了水库异重流排沙计算。对于干支流向异重流倒灌,谢鉴衡^[42]、范家骅^[72]、金德春^[73]、韩其为^[74]、秦文凯^[75]等都 有所研究,其中文献[74,75]还对倒灌淤积做了专门工作。吕秀珍按势流理论对排泄异重流的孔口有专门成果^[76,77]。

我国西北部一些河流,常常出现很高的含沙量,这些高含沙水流进入水库后,既可能加速淤积,又可能利用其排泄泥沙,特别是洪峰后的排沙。我国学者在沙玉清^[40]、钱宁^[78]、张瑞瑾^[42]等带动下除对高含沙水流的流变特性、它对泥沙沉速的影响以及输沙规律等有较深入研究(集中反映到钱宁主编的“高含沙量水流运动”专著^[78])外,尚有对水库颇为重要的高含沙挟沙能力规律方面的成果,如张浩、许梦燕^[79]、曹汝轩的研究^[80]。方宗岱和胡光斗^[81]、焦恩泽^[25]等对实际水库高含沙量淤积进行了分析,陈景梁等对水库高含沙量和浑水水库排沙的实际资料进行了分析和研究^[24,82,83],王兆印及张新玉对高含沙水流进行了试验等^[84]。

在水库淤积形态方面,我国研究较早的是三角洲淤积。20世纪50年代末60年代初根据官厅水库的资料,水利水电科学研究院河渠所对三角洲的淤积形态及计算做了初步研究^[85,86],60年代张威提出了三角洲的一种计算方法^[87],70年代初韩其为根据非均匀悬移质不平衡输沙的规律首次从理论上详细论证了水库淤积的三角洲趋向性、它形成的特点、三角洲和前坡淤积比例、洲面线与水面线方程以及前坡长度等^[88,89,90,91],罗敏逊用官厅水库的资料验证了韩其为的三角洲理论结果^[92]。此外愈维升和李鸿源通过水槽试验,证实了沙质推移质在壅水区也是以三角洲形式向前推进^[93]。除三角洲外,韩其为还对锥体淤积从理论上证实了其淤积剖面近似直线,以及坝前淤积厚度与总淤积体积近似于线性关系^[94];他还给出了带状淤积条件^[94]。杨克诚对滞洪期锥体淤积水库冲淤变化特征做了分析和研究^[95]。对于水库的三角洲、锥体及带状等三种淤积形态,罗敏逊^[92]、焦恩泽^[96]、韩其为^[89,91]、陈文彪和谢葆玲^[97]等分别提出了其判别方法。

水库排沙是水库淤积中颇为重要的一环,有很大的实际意义。对水库排沙的方式曾有多种研究,除一般的依靠水流冲刷外,对小水库尚有水力吸泥泵^[98]以及高渠拉沙冲滩^[99]等。有不少水库的排沙特性被分析研究,如陕西省水科所和泾阳县治峪河管理局对黑松林水库^[100],红领巾水库管理所、内蒙古水利勘测设计院对红领巾水库的研究^[19],辽宁省水科所、彰武县闹德海水库管理所对闹德海水库^[18],青铜峡水库站、青铜峡电厂对青铜峡水库^[6],广灵县水利局对直峪水库^[101],山西水科所^[102]和凌来文、郭志刚等^[103]对恒山水库等均结合具体条件对排沙做了较广泛的研究。此外张振秋和杜国翰^[21]、曹叔尤和张新平^[22]、陈洪升^[33]、陈景梁和赵克玉^[24]、彭润泽和刘善钧等^[104],以及曹叔尤、张新平、关业祥和周宾等^[105],张崇山和唐仲元等^[28],张崇山和王孟楼^[106],赵克玉和陈义琦等^[29],焦恩泽^[107],黄华忻和赵克玉^[108]等结合具体水库对有关水库排沙和减淤以及恢复库容也做了不少的研究,有的还颇为深入。三门峡水库的排沙是研究最多的一个水库,其中水电部第十一工程勘测设计科研院^[109]、黄委会规划设计大队^[110]、清华大学水利系治河泥沙教研组^[111]等

均有专门研究。具体水库的排沙的分析和生产需要引出了一些研究排沙共同规律的成果。早期多为经验性的,较有影响的有陕西水利科学研究所河渠研究室与清华大学水利工程系泥沙研究室用中国资料验证过的 G. M. Brune 的水库拦沙率曲线^[112]和他们的水库冲刷的排沙关系^[112],以及张启舜和张振秋的壅水状态下排沙比^[113]和涂启华的排沙比^[114];后者还认为其排沙比关系可以包括异重流。由不平衡输沙理论研究壅水排沙一般规律是韩其为的工作^[94],他给出的理论关系在不同参数下可以概括 Brune 拦沙率、张启舜和涂启华的排沙比关系,而且能概括一些前苏联学者如 В. Н. Гончаров、Г. И. Шапов、В. С. Лапщенков、И. А. Шнеер 等为研究库容淤积方程提出的关于出库含沙量的假设^[94]。

水库排沙中有一种重要形式,就是溯源冲刷,它不仅能排走上游来沙,而且能冲走前期淤积物。溯源冲刷常发生在水库泄空时的坝前以上河段或三角洲前坡以上河段。由挟沙能力方程和河床变形方程适当简化后,可将溯源冲刷的纵剖面方程化为二阶常系数热传导(偏微分)方程,在数学物理方程中对此已有成熟的解法。彭润泽、白荣隆等最早对推移质进行了这方面的实验研究和求解^[115],得到的结果与实际颇为符合。云南省电力勘测设计研究院也做了类似的工作^[116]。曹叔尤^[117]对这种方法做了进一步研究,按一般的初始条件和边界条件,求出了分析解,并且以悬移质的溯源冲刷进行了检验。巨江^[118]改变了前三位研究者在有限的区域求解方程的方法,将其在无限区域内进行,从而获得能够直接积分河床变形方程,使解颇为简单;当然,其冲刷长度必须定义。此外还有一些对溯源冲刷进行数字解的成果,如彭润泽和牛景辉^[119]、巨江^[118]的成果。钱宁和周宾等^[120]通过试验深入阐述了溯源冲刷机理和特性;对溯源冲刷机理研究的还有邓志强^[121]、张跟广^[122]。后者通过水槽试验论述了溯源冲刷除一般的“全程剥蚀”外,尚有“局部跌坎”,指出冲刷基本发生在跌坎处,以其不断崩塌的形式进行,其条件是颗粒细,淤积物干容重大。当然这种现象在实际水库中是否经常出现或始终贯彻到一个水库的冲刷过程,尚未得到证实。经常见到的是含有黏土淤积物处,当颗粒很密实时会出现跌坎,但跌坎以上往往仍有沿程冲刷;而且跌坎存在往往只在一定时间和一个小的河段。研究溯源冲刷的另一种方法是在对冲刷纵剖面进行假设的基础上可导出一些冲刷的参数。一些学者因此求出了冲刷量的变化等。其中韩其为认为采用恰当的冲刷纵剖面也可使其与实际符合得很好,甚至在一些条件下其精度与二阶偏微分方程求解结果不相上下;对此他得到一套详细的反映溯源冲刷的成果^[123]。采用一般河床演变数学模型的方法,不必对挟沙能力公式(实际是含沙量公式)做较多简化而研究溯源冲刷的也有韩其为的成果^[124]。

利用水库淤积和排沙规律,通过水库调度,采用所谓“蓄清排浑”的方法,对某些水库在实践中摸索了一些成功经验,使水库淤积大量减缓,甚至不再淤积。其中较典型的有对闹德海水库^[18]、黑松林水库^[100]、直峪水库^[101]、恒山水库^[102]、红领巾水库^[19]等的研究。当然这些多为中小型灌溉水库,有颇为有利的排沙条件,坡陡,库短,有时允许泄空,甚至坝前水位完全不壅高。与此同时,从理论上研究综合利用水库的淤积控制也在一些研究者中间展开。大型综合利用水库的特点是库长、坡缓而且常年蓄水。正是因为后者造成水库常年抬高侵蚀基面,导致了水库的坡度减缓。这些不利排沙的因素,限制了一些中小型灌溉水库排沙经验的照搬。从20世纪60年代开始,唐日长、林一山根据闹德海水库和黑松林水库成功经验的实质,提出了水库长期使用的设想和概念^[125,126],在三门峡水库1973年改建完成前的1964~1966年,就预见了他能做到长期使用;并且认为如果水库建在峡谷中

(八里胡同坝址),长期使用指标更为优越。后来由韩其为进一步从理论上阐述了水库长期使用的原理和根据,并给出了保留库容的确定方法^[127]。与此同时,一些单位如水电部十一工程局勘测设计科研院^[128]、黄河水利科学研究所^[129]和钱意颖^[130]等,也开始对三门峡水库如何保持有效库容的问题进行了探索。但是从理论上详细论证水库长期使用的根据、它在技术上的可行性和经济上的合理性以及其最终保留形态的确定,则首推韩其为的论文^[131,132]。三门峡水库改建并运行的成功,从实践上证实了大型综合利用水库长期使用的可能性。其次黄河一些大型水库如青铜峡^[6]、三盛公^[133]等水库淤积也分别得到了控制。至此在泥沙界对水库长期使用,无论在理论上或实验上均获得了共识,这反映在夏震寰、韩其为、焦恩泽合写的论文中^[134]。三峡水库淤积控制的研究,使水库长期使用的研究进一步深入,韩其为和何明民给出了长期使用水库的造床特点和建立平衡的过程、相对平衡纵横剖面的塑造、第一第二造床流量的确定^[135]等。至此我国水利、泥沙科技工作者经过长期探索,研究的水库长期使用,无论在理论上和解决实际问题上都已颇为成熟。正因为如此,对于我国在这方面的成就,加拿大C. Y. J. V. 在三峡工程可行性研究报告中写到:“指出这一点是非常重要的,平衡坡降和水库长期使用库容的理论在中国已发展为一种成熟的技术,三峡工程处理全部泥沙的策略就是建立在这个基础之上。世界上没有一个国家像中国一样在水库设计中有那样多的经验,以致使调节库容和防洪库容能无限期保持^[135]。”

水库的推移质淤积、变动回水区的冲淤及淤积引起洪水位的抬高是水库淤积研究的一个重要方面,不仅有一定理论价值,而且对淹没、通航及与上游梯级连接等也有很大实际意义。由于一般水库主要是悬移质淤积,推移质占的比例较小,所以我国对推移质淤积研究较少。入库推移质往往缺乏实测资料,丹江水文实验站对丹江口水库^[136]、胡煜煦对山东一些水库^[137]通过对不同粒径的淤积数量分析,确定了其推移质淤积数量及组成。对于不同粒径推移质在水库中的淤积部位、特点等,韩其为、童中均等曾做了大量调查,归纳出一些特性^[138,139]。较长时间推移质淤积部位及剖面如何确定,可参考韩其为的论文^[131,135]。对于推移质的溯源冲刷,有前面已提到的彭润泽等成果^[115,116]。淤积引起的回水抬高和再淤积,即所谓的淤积“翘尾巴”的估计,有一些研究成果和经验公式,如谢鉴衡^[140]、陈文彪^[141]、杜殿勋和戴明英^[142]、明宗富^[143]等的研究。也有结合实际水库分析淤积上延的,如赵宝信^[144]、姜乃森^[145]、姜乃森和张启舜等^[146]以及焦恩泽和张翠萍^[147]等的研究。水库淤积的上延,首先是淤积引起的回水的上延,上延后的回水又产生了新的淤积,如此不断相互作用,形成了水库淤积的翘尾巴。何明民、韩其为从理论上对淤积引起的水位抬高做了较深入的研究^[148],给出了回水抬高的方程、它的一系列特性以及回水末端定义等。变动回水区的冲淤是水库淤积最复杂的问题。韩其为等^[149]、杨克诚^[150,151]、韩其为和童中均等^[152]对丹江口水库变动回水区冲淤特性进行了专门研究,其中不少内容具有一般性。王维国^[153]、王荣新^[154]、舒安平和黄金堂等^[155]、庞炳东^[156]对变动回水区河型特点及转化的可能性有所研究。对变动回水区不同淤积河段(包括卵石、砾石、粗沙和细沙)的冲淤特性、河势特点等进行较全面阐述的,有韩其为和童中均等的文章^[138,139]。至于变动回水区冲淤对航运的影响,也有一些调查成果,如韩其为、童中均等^[138,157]、杨克诚、蒲跃襄等^[158]、秦荣昱^[159]等成果。

水库淤积计算是水库淤积和工程泥沙的重要内容之一,它的预报结果对水库规划和水库运用均是必须的。我国对水库淤积计算方法的研究成果分为三种类型。第一种只估

算水库总淤量及其变化过程。第二种经过对水库淤积规律的研究,得出淤积各种参数的直接计算方法,例如对于三角洲的洲面坡降、长度、前坡坡降等,直接给出公式确定;有人将这种方法不很确切的称为水语法。第三种是采用河流动力学的有关方程和方法构造模型,分时段、分河段求解,它不是直接计算有关淤积参数,而是据求解结果得出,这种模型可称为河流动力学数学模型。所述这三种类型的计算方法,各有特点和适用条件。对于第一类计算方法,前面的有关水库排沙的研究成果,就能估算出库容淤积过程;与此对应的还有直接估算水库总淤积量的。前面已提到的韩其为曾利用不平衡输沙理论导出了一个较为通用的出库含沙量关系,它能概括 Brune 拦沙率、张启舜等排沙比和 Гончаров 等出库含沙量关系^[94],据此得到的库容淤积方程及其解也能概括 Гончаров、Шамов、Лапшенков、Шнеер 等人的库容淤积公式^[94]。陕西省水利科学研究所河渠研究室和清华大学水利工程系泥沙研究室也提出过一个库容淤积公式^[112]。对于第二种类型的水库淤积计算较典型的是对于三角洲淤积体的水库有计算它的形成条件的文献^[91,92,96,97]以及黄河水利委员会勘测设计规划研究院(涂启华、李世莹等)^[114]、焦恩泽^[92]等的成果。三角洲各项参数计算的方法及其公式可从文献[86,87,90,91,114,160]中找到。其他不同形式的排沙(如壅水排沙、异重流排沙、敞泄排沙、溯源冲刷)效果,水库淤积末端的上翘长度、库尾的比降等,除前面有关文献载有这些内容外,较系统的介绍有黄河水利委员会勘测设计研究院^[114]、焦恩泽^[96]以及姜乃森^[160]、山西水利勘测设计院^[161]、陕西省水利科学研究所河渠研究室^[162]等的文章。张启舜将他研究的这种直接计算水库淤积参数的方法,编制成数学模型^[113,163],并且得到了较广泛的应用。涂启华也有类似的模型。后来黄委会勘测设计研究院以第二类模型为基础,将功能扩充,仍能使用到小浪底水库的淤积计算,并且与第三类数学模型结果相近^[164]。第三种类型计算水库淤积方法是根据水流运动方程、水流速连续方程、泥沙运动方程、泥沙连续方程、河床变形方程等进行求解给出淤积过程、淤积部位(包括淤积形态)、淤积物级配及淤积引起的水位抬高等。从原则上说,好的河床动力学数学模型在一定补充条件下应能基本满足水库淤积计算的需要。我国目前已有多种一、二维这类数学模型,但是经过实际水库冲淤资料检验,并已在生产中多次正式使用的有如下几个。其中有最早建立、并在 1973 年即开始使用的韩其为模型^[165,59]以及长江科学院在文献[165]的基础上完善的数学模型^[60]。这两个模型为非均匀沙一维不平衡输沙模型,均经过大量水库淤积与河床演变资料检验,功能全,可靠性好,在三峡论证期间被确定为预报三峡水库淤积的模型。在黄河上这类模型经过三门峡水库淤积长系列验证,并用到小浪底水库淤积预报的有王仕强模型^[166]、曹汝轩和王新宏模型^[167]、黄河水利委员会勘测规划设计研究院模型^[168]、韩其为模型^[59,169,170]、黄河水利科学研究所曲少军、韩巧兰模型^[171]和张俊华等模型^[172]。需要指出的是,要全面反映水库淤积过程中的各种信息,对不少数学模型来说目前尚有一定差距,这是今后应进一步解决的。

在水库淤积控制方面除库容淤积控制即水库长期使用研究已在前面叙述外,韩其为^[173]在变动回水区的航道控制方面提出了航运控制调度原则。即要求枯季坝前水位不低于或等于航运控制水位(消落水位),加大变动回水区的航深和减少对航运不利的消落冲刷。这种调度已在三峡水库中应用,使枯季水深明显加大。在坝前泥沙控制方面,即对坝区船闸和引航道的淤积和水流条件,张瑞瑾等^[174,175]提出了“静水过船,动水冲沙”的原则,通过在上、下游修建隔堤,分开引航道与泄洪道来实现。在坝前引水防沙和排沙设施,

除排泄异重流底孔外,万兆惠^[176]、熊绍隆^[177]、王庆祥和李养志等^[178]以及张开泉、刘焕芳^[179]还对坝前漏斗的尺寸及排沙涡管等进行了研究。

此外水库的另一些专门问题也有较深入研究。对水库悬移质是否划分床沙质与冲泻质有两种研究成果。原水利水电科学研究院河渠所^[85]和王尚毅^[180]等按照传统的概念,认为应划分床沙质与冲泻质。前者认为床沙质淤在三角洲的洲面段(即尾部段和顶坡段);后者根据他提出的自动悬浮理论来划分出冲泻质。其实对于一般冲积河道,我国钱宁^[41]和张瑞瑾^[39]都认为需要划分床沙质与冲泻质,但是钱宁还认为两者符合同样的挟沙能力规律,只是补给条件有所差别^[41]。另一些研究者,包括沙玉清^[40]就是从全沙出发研究挟沙能力。韩其为为进一步论证了床沙质与冲泻质符合统一的挟沙能力规律^[181,182],并利用非均匀沙挟沙能力与非均匀沙不平衡输沙规律,能够解释它们在水库和河道中运动现象上的差别^[88,181]。对于淤积物体积与重量之间的换算、泥沙起动和冲刷分析所必须的干容重,也开展了较深入的研究。方宗岱和尹学南^[183]、王玉成等^[184]、胡煜煦^[137]整理分析了一些水库淤积物干容重的资料。丹江口水库实验站王荣新等^[185]做了淤积物密实与干容重变化的室内试验。韩其为和王玉成等^[186]据薄膜水临界接触条件,给出了初期干容重的定义及粗细颗粒干容重的表达式。后来韩其为、何明民^[187,188]还根据饱水土压密理论,给出了干容重随时间和深度变化的关系。对于水库峡谷段的糙率韩其为^[189]、惠遇甲^[190]、陕西省水利科学院研究院河渠研究室和清华大学水利工程系泥沙研究室^[114]、姜乃森、缪集泉^[191]等收集了一些实测资料并进行了分析。韩其为建立了水库淤积过程中糙率减小与淤积面积的关系^[192]。

在水库下游河道冲刷和变形方面,我国也进行了大量观测和分析研究。其中有代表性的成果为水利水电科学研究院河渠所^[193]对官厅水库下游永定河,钱宁^[194]、钱宁和麦乔威^[195]、李保如和华正本^[14]、麦乔威和赵业安等^[196]、刘月兰和张永昌^[197]、赵业安、刘月兰和韩少发^[198]对三门峡水库下游黄河,韩其为和童中均^[15,199,200]、杨克诚、向熙珑、王玉成、周开萍、黎力明、石国钰等^[201,202]对丹江口水库下游汉江,均做了全面深入研究。此外林振大^[203]对拓溪水库日调节时下游河道,王秀云和施祖蓉等^[204]对水库下游永宁江感潮河段,王吉狄、臧家津^[205]对水库群下游辽河,以及李任山、朱明昕^[206]对闹德海水库下游柳河等均做了相当研究。对于水库下游河道冲刷和变形中的几个专门问题,也有了较深刻的成果和规律性的揭示。对下游河道清水冲刷时床沙粗化,尹学良给出了其计算方法^[207]。韩其为提出了交换粗化^[208],能解释粗化后的床沙中最粗颗粒可以大于冲刷前的,同时给出了六种粗化现象和两种机理,并且给出了相应的计算方法^[208]。对于水库的水沙过程及数量改变后对下游河床演变的各方面的影响,韩其为、童中均专门做了论述^[209]。钱宁研究了滩槽水沙交换,认为它导致了水库下游河道长距离冲刷^[210]。韩其为证实了清水冲刷中粗细泥沙不断交换,才是下游河道冲刷距离很长的基本原因^[211,212]。

最后需要强调说明的是,在上述野外观测、资料分析以及水库淤积和下游河道变形理论研究的基础之上,我国工程泥沙研究也取得了很大进展。特别是举世瞩目的三峡水利枢纽工程和小浪底水利枢纽工程的水库淤积与下游长江和黄河的冲刷研究成果,集中表现了我国在解决水库与下游河道工程泥沙问题的成就和先进水平。其中三峡工程研究成果共13大本,可参见文献[213,214,215,216,217,218];小浪底工程的研究成果,主要见参考文献[35,219,220,221,222]。

0-5 水库淤积的理论体系

前面已指出,我国在水库淤积方面做了大量的观测和研究工作,取得了很多成果,目前已由河流动力学的一个分支发展成为一门独立的学科提供了丰富的素材。本书正是在这个背景下,作者通过多方面20余个专题的多年的深入研究,揭示了内在机理,进行了理论上的概括。但是作为一门学科,从理论上,它的体系如何?如何将这些丰富的研究成果的精华汇成一个整体,并在本书中体现,是我们的目的。

从学科的系统性,结合水库淤积的各种现象和问题,我们认为水库淤积应包括三个方面的内容:水库淤积的现象及规律、水库淤积计算、水库淤积控制。水库下游河道冲刷及河床变形,是与水库淤积密切联系的,而且使用的方法与水库淤积也有一定共性,因此它常作为水库淤积的一部分附属内容。

水库淤积的基本现象和规律部分,首先应包括水库泥沙运动的一般规律,即水库悬移质运动的一般规律——非均匀悬移质不平衡输沙规律,以及某些特殊的规律,如水库浑水异重流和高含沙水流、水库推移质运动等的规律。其次应包括水库淤积形态、推移质淤积、水库排沙和冲刷、变动回水区的冲淤以及淤积和回水的相互作用等。同时,还包括水库淤积平衡的各种规律,如悬移质平衡坡降、平衡纵横剖面的塑造以及推移质平衡剖面 and 保留库容等。此外,水库糙率和干容重变化虽不直接属于水库淤积范畴,但他们既随水库淤积和下游河道冲刷而变,而且对冲淤又有一定反作用,加之没有其他学科专门研究,所以也应包括其中。

水库淤积计算是水库规划、设计以及运用中解决泥沙淤积问题的常用手段之一。目前针对不同的问题,已提出各种计算方法。前面已指出,这些计算可分为三类。第一类为水库总淤量及发展过程估算。这往往适用于中、小型水库。第二类是根据水库淤积的规律直接计算各种参数,包括水库排沙和冲刷、异重流潜入和运行,淤积形态(三角洲、锥体、带状)的纵剖面、推移质淤积部位等计算。当然这类计算也可将各种计算组成数学模型,以全面的反映水库淤积过程和部位。第三类为采用河流动力学方程求解来计算水库淤积过程和部位,以及其他淤积和输沙的信息;这类计算较为复杂,必须组成数学模型进行。本书限于篇幅,未专门分篇进一步叙述,但是各种计算的理论根据和有关公式在书中均有所阐述。其中第一、二类水库淤积计算,根据本书的内容,读者应能构成计算方法和模型。对于第三类计算方法,读者可详见这方面的研究成果,也可参阅我们即将出版的另一本专著。

水库淤积控制是指如何利用水库淤积的客观规律改造水库淤积,使其尽可能发挥水库最大综合效益。水库淤积控制应包括库容淤积控制——水库长期使用调度控制,淤积引起洪水抬高控制(包括回水末端控制),变动回水区航深控制,坝前泥沙及水流条件控制、下游河道冲刷控制等五个方面。对水库寿命较短的水库,库容淤积控制是水库淤积控制的中心。广泛地说,库容淤积控制又分三个方面,即流域来沙治理、上游梯级来沙调节以及本水库的水库长期使用调度。流域来沙治理属水土保持范畴,且大流域水土保持减少来沙的效果较慢,在水库淤积研究中往往只能将其已有的效果反映到水库来沙中。而上游梯级水库自然拦沙,效果明确,但是如与本水库联合调沙,关系十分复杂,很难一般而论,最后也只能从本水库来沙变化考虑其影响。因此在本书中库容淤积控制只能从本水库出发

进行研究。

水库下游冲刷和河床变形与淤积状态密切相关,一般可按泄泥沙分为三个阶段:(清水)冲刷过程、下泄含沙量逐渐恢复后河床的回淤过程及水库淤积平衡后河道的冲刷变形。本书中论述前两种过程,并以冲刷过程为主,至于第三种变形,属于一般河床变形,不专门涉及。

0-6 本书的主要内容和进展

本书是根据我们多年研究成果编写的专著,其中绝大部分内容均有所进展和创新。以下择其主要予以介绍。

第一章阐述了非均匀悬移质不平衡输沙规律,它是水库淤积的理论基础。其主要内容如下。①根据泥沙运动统计理论的非均匀悬移质与床沙底部交换强度的边界条件、积分二维扩散方程导出了一维不平衡输沙基本方程,同时给出了挟沙能力新的结构式。②定义了挟沙能力级配,引进了两种基本挟沙能力,即上游来沙的挟沙能力与床面泥沙冲起的挟沙能力。根据输沙状态可以构成不同条件下挟沙能力公式,能够解释冲刷和淤积、长江与黄河、河道与水库的不同情况的挟沙能力。③在理论上建立了平衡条件下恢复饱和系数的表达式和给出了数字结果。数字结果指出,它即可能大于1,也可能小于1。对一般冲积河道,它基本上接近1或小于1,最小值可达0.02,与黄河下游采用的经验值颇为接近。同时其平均值与作者以前建议并较为流行的冲刷时为1,淤积时为0.25的经验基本一致。④给出了均匀沙与非均匀沙含沙量沿程变化,悬移质级配及床沙级配变化的表达式。其中特别引进微冲微淤条件下悬移质级配变化的结果,它同时决定于进口断面的悬移质级配和进出断面的床沙级配。⑤对床沙质与冲泻质划分问题做了深入讨论,在指出现象上的差别后,揭示了它们具有统一的挟沙能力规律,并给出了具体表达式。认为在冲积河道中如果采用非均匀沙挟沙能力理论和不平衡输沙理论可以不划分床沙质和床泻质,而能描述其运动。若要划分,忽略冲泻质,则需要修正与其相应的水量百分数。

第二章为水库异重流及高含沙量,主要内容如下。①浑水异重流潜入方面除以前一般采用的潜入条件外,补充了均匀流的条件,即异重流作均匀流运动时应满足正常水深必须小于水库水深,否则转为明流,从而解释了缓坡水库潜入点修正福氏数远小于0.60的情况。②证实了异重流的含沙量变化仍符合不平衡输沙的关系,可以直接计算其含沙量与级配,只是此时的水力因素应只考虑浑水部分。③论证了水库异重流总是明显的超饱和,其含沙量明显地大于挟沙能力,因此异重流运行总是要伴随淤积。④阐述了水库异重流排沙及其条件。⑤深入研究了异重流倒灌淤积的机理,给出了含沙量沿程变化、倒灌长度、淤积分布等,并用丹江口水库八个支汉口门段倒灌淤积资料验证了倒灌长度及淤积量,结果是符合实际的。⑥研究了水库高含沙两相紊流输沙,引进了泥沙挟带薄膜水的影响,解释了高含沙挟沙能力关系的反曲(即含沙量加大后,水力因素反而减弱),并给出了计算关系,这与以往的资料基本一致。同时还论证了高含沙量洪水产生的揭底冲刷的机理及起动流速计算。⑦给出了高含沙量两相紊流异重流不淤甚至冲刷的条件。最后还提到水库中的泥浆淤积物,它在横剖面水平,纵向有一定坡度。

第三章为水库淤积形态,主要内容如下。①以大量实际资料说明了水库淤积的纵、横

向形态特点以及它的表示方法和适用条件。②以新的观点论述了水库淤积三种纵向形态(三角洲、锥体和带状)的形成条件及转化。③深入研究了水库淤积的三角洲趋向性,证实了只要坝前水位变化小,水库淤积体必然发展为三角洲。利用不平衡输沙的数学模型给出了一个典型悬移质三角洲形成发展的实例,其中详尽地描述了各种参数的变化。④在一些简化条件下对三角洲淤积百分数、洲面淤积百分数、洲面线及相应的水面线、顶点水深、前坡长度、前坡淤积百分数以及各段级配等给出了理论上的表达式,它与实际资料是符合的。⑤论证了在坝前水位变幅下三角洲维持其外形的条件。⑥在一定简化条件下,导出了明流锥体淤积的条件、淤积过程中纵坡降和坝前水深与库容的关系,以及库容淤积过程的方程。⑦给出的淤积过程的方程可以概括 Шамов、Гончаров、Лапшенков、Шнеер 等库容淤积公式。⑧分析了典型与非典型带状淤积的水位变幅等条件。⑨论证了三种纵向淤积体的相互转化,指出淤积百分数的大小(坝前水位的壅高程度)及坝前水位的变幅是决定三种淤积体形成和转化的基本条件。⑩对水库淤积横剖面进行了分类,指出了它们出现的条件,区别了单纯淤积与冲淤交替时累计变形后的淤积对横剖面的影响。

第四章为推移质淤积,主要内容如下。①深入地研究了推移质不平衡输沙,根据泥沙运动统计理论给出了其方程,并且给出了近似解。该方程既反映了推移质与床沙的交换,也反映了推移质与悬沙的交换。对沙质推移质,这显然是必须的。可以证明,在这两种交换下,强平衡几乎是不可能的,所以沙质推移质不平衡输沙几乎是绝对的。②由于推移质发生在床面及其附近,所以不平衡输沙向平衡输沙调整速度又很快,这是它的不平衡输沙的另一个特点。③根据泥沙运动统计理论,导出了非均匀沙推移质低输沙率理论公式,并且给出了其数字结果。根据理论公式结构,结合实际资料,给出了适合不同粗细泥沙、不同强弱水力因素实用的输沙率公式。④利用野外和水槽试验资料,概述了推移质淤积的一般特性及淤积时粗细颗粒的分选。⑤给出了当水力因素减弱后悬移质转化为推移质的估算方法,并用长江寸滩与宜昌的资料进行了验证。⑥论证了卵石及沙质推移质单独淤积时的有三角洲趋向性,并给出了其纵剖面。⑦按泥沙起动平衡导出了推移质单独淤积时三角洲洲面纵剖面的表达式,包括淤积长度、淤积总量等关系。⑧推移质淤积的三角洲趋向性,是指推移质单独淤积。实际上推移质淤积时均会发生悬移质淤积,因此它们同时淤积时则不是三角洲形态。⑨悬移质淤积平衡后推移质的淤积形态一端与天然河床剖面相交,另一端与悬移质淤积平衡剖面相交,而不再是三角洲。研究了这种形态的河底剖面和水面的方程、坡降方程、淤积厚度分布、覆盖悬移质段的长度及单独淤积的长度和总淤积长度,以及淤积总量。同时也给出了这些参量与时间的关系。利用丹江口水库、黑松林水库、直峪水库,在悬移质淤积剖面已知的条件下,验证了它们推移质淤积形态及剖面,其结果基本符合实际。⑩当悬移质淤积平衡后,对坝前水位变化很大的水库,推移质覆盖悬移质长度还随着水位变化而变。对于这种条件也给出了推移质淤积纵剖面。⑪研究了水库悬移质淤积过程中推移质与悬移质不断发生的交错淤积,这种情况颇为复杂。⑫交错淤积决定于推移质剖面线下端点(它与悬移质剖面相交)随时间的移动。对于指定的水库,在知道悬移质与推移质来量后,可以求出该点的变化过程。当推移质来量小于某个临界值时,它的下端点随着时间向上移动,即推移质淤积段后退;反之当推移质来量大于该临界值时,该点随着时间向下移动,即推移质淤积段下延,进而给出了推移质淤积下端点不变的临界推悬比。⑬给出了交错淤积时推移质淤积纵剖面的方程、水面线方程、淤积长度、淤积量等随时

间的变化。

第五章为水库冲刷与排沙,将冲刷与排沙分为三类,即壅水排沙、溯源冲刷及敞泄冲刷。①给出壅水明流排沙的基本方程,包括含沙量及级配;当水库淤积百分数很大时,这一组方程可以简化。②随着淤积,一些粗的甚至中等颗粒泥沙大量淤积后,此时应注意水量百分数的调整,使细颗粒水量百分数大为增加,从而使其挟沙能力相应加大。可见水力因素沿程减弱,而水量百分数沿程加大,两者相互抵消,正是水库细颗粒不易淤积完的原因。③导出的壅水排沙时的排沙比及淤积百分数的公式,能够概括前苏联和我国一些研究者的一些结果和经验关系。④对溯源冲刷时坝前水位突然降低和连续降低,以及剖面为直线、二次曲线、高次曲线等不同条件,得到了一套溯源冲刷的冲刷长度、坡降、冲刷量等表达式,以及相应的纵剖面。对于二次曲线以上的剖面形态,有关参数与实验资料基本符合。此外还介绍了冲刷纵剖面偏微方程的曹叔尤解法。⑤较深入地分析了水库敞泄排沙的机理,利用微冲微淤的概念导出了进库含沙量衰减及出库含沙量的组成。它为三部分:进库含沙量衰减后剩下的、进库含沙量衰减下来的部分转为挟沙能力后再影响到的含沙量及由床沙冲起的挟沙能力转为含沙量。而出库挟沙能力仍由两部分按权重叠加:进口断面含沙量衰减后剩下的转为挟沙能力;由床沙冲起部分的挟沙能力。

第六章为淤积与回水的相互作用,主要内容如下。①对矩形断面积分定常非均匀流方程,通过分析法和数字积分法给出了相对水深与相对距离的关系表,可以十分简单地求出壅水时的水面曲线。②回水末端只有约定的意义。对于回水末端水深定义的精度高,则它的相对长度一般均大于1,并且随流量增加,末端上延;反之如末端水深定义精度低,则其相对长度一般小于1,并且随着流量增加,末端下移。后面这种为习惯看法,可见它是很有限的。③深入分析了淤积引起的回水抬高的机理,给出了其积分方程,指出了其一系列特性;例如某点的水位抬高,首先与平衡坡降、水库静水长度、淤积后正常水深的变化 $\frac{h_n}{h_{n,1}}$ 成正比,而与水库初始时刻的壅水程度、初始时刻的相对水深成反比,还与初始时刻相对水深分布、淤积后相对水深分布(自然包括淤积厚度分布)有关。④给出了淤积引起水位抬高的沿程分布,它为一钟形曲线,其中最大抬高在初始回水末端稍下处,并且在在该点以下库段水位抬高由下游向上游是增加的,而在该点以上库段由下游向上游是减小的。⑤在回水抬高最大值以下的库段,是淤积加大了坡降;反之在该点以上库段是淤积导致了次生回水,减少了坡降。后者才使天然坡降向平衡转换成为可能。⑥列举了锥体淤积引起水库水位抬高的例子,并介绍了其确定方法。

第七章为水库变动回水区的淤积,其主要内容如下。①首先阐述了变动回水区的回水影响,列举了两种典型运用(综合利用与径流发电)时水库回水范围的变化和不同的影响。②论证了壅水程度对滩槽流速分布的影响,得到了:壅水高,滩槽流速分布差别小;壅水低,滩槽流速分布差别大。这正是淤积时滩槽均淤、冲刷时集中主槽的根据。加上冲刷时主槽滚雪球似的发展(主槽冲刷——其分流比加大——进一步冲刷……),最后形成变动回水区淤滩存槽,甚至淤滩刷槽。③变动回水区淤积与泥沙粗细有很大关系:卵石淤积河段短,多为淤滩存槽,而且在时间不很长时淤积不连续,常常夹杂一些粗沙、砾石;粗沙砾石淤积河段,河底常较平坦,缺乏深的主槽,河道顺直时,易形成犬牙交错边滩;中细沙推移质淤积数量大,累计淤积以淤滩存槽为主。④消落冲刷是变动回水区冲刷的一种主要形

式,而且出现时间长,对航道影响大,值得重视。卵石淤积物消落冲刷往往仅发生于浅滩(过渡段)处,冲刷的数量小,并且在紧接其下就淤积而形成局部三角洲。粗沙砾石消落冲刷由于河底平坦,有时形成边滩与主槽同时移动。中、细沙消落冲刷冲刷量大,在窄深河槽冲刷较快,但是在宽浅顺直段且又位于变动回水区下段,可能形成游荡摆动,横向冲淤交替,对航运不利。⑤变动回水区既有累计性的淤积,又有冲淤交替,从而增加了河床的可塑性,还会使河势、河型发生一些改变。变动回水区河势的特点是边滩发育,滩槽差加大,水流沿程均匀性增加等。变动回水区的一些分汊河型有支汊淤堵、向单一河道发展的趋势,同时弯曲段也有使河弯增多或增长的可能,原因是河床变为窄深,弯道环流有发展的潜力。

第八章为水库淤积的平衡,主要内容如下。①提出了水库淤积过程的三个转折点,将水库淤积过程分为四个阶段:淤积阶段、悬移质淤积初步平衡阶段、悬移质淤积平衡阶段、推移质淤积平衡阶段。对一般情况,水库淤积平衡是指水库淤积的第三阶段。②利用实际水库资料和数学模型计算实例,分析了水库淤积平衡后的排沙比,进出库级配差别及其沿深度的变化,以及继续少量淤积及冲淤变化的机理。③按照不同运用方式的水库,阐述了它们年内冲淤的机理、冲淤与流量的关系以及水库对含沙量的调整(使出库含沙量变幅大为增加)。④分析了水库的造床期及其造床特点、塑造纵剖面与冲积河道的差别,论述了第一造床流量的意义和表述、悬移质相对平衡纵剖面的确定以及第二造床流量的意义、表述和相对平衡横剖面的塑造。⑤给出了最终保留库容和平衡淤积量的确定方法及槽库容淤积过程的表达式。⑥在概化断面形态的基础上分析了滩库容淤积的机理,进而给出了滩库容淤积过程的表达式,它较之槽库容淤积要慢得多。

第九章为水库糙率与干容重,主要内容如下。①定义了淤积物初期干容重,利用颗粒夹带薄膜水的特点,阐述了细颗粒初期干容重的机理,给出了初期干容重理论表达式,并用较可靠的实验和野外实测资料进行了验证。②考虑到粗、中颗粒彼此接触的紧密程度差别及光滑情况,建立了一个描述卵石、砾石、粗沙干容重随粒径变化的关系。③采用随机冲填模型计算了不同粒径之间的接触概率。考虑了细颗粒对粗颗粒孔隙之间的冲填,建立了由均匀沙干容重叠加非均匀沙干容重的公式,并且用实际资料进行了检验,彼此颇为符合。④根据饱水土的压密理论,阐述了淤积物密实机理,并用干容重变化的实际资料检验了理论结果。⑤在适当简化条件下导出了淤积物干容重沿深度分布和随时间分布的表达式,这些式子与实际资料颇为符合。⑥介绍了淤积物密实的室内试验。⑦提出了随着时间变化水库淤积物因密实导致厚度变化的修正方法。⑧阐述了水库淤积前糙率确定方法,包括有资料和无资料时对新增湿周上糙率的确定。其中对山区、峡谷河道边壁糙率给出一种较普遍的经验关系。⑨对床面糙率的叠加与分解提出了一种试算方法。⑩介绍了王仕强计算动床糙率的方法;还分析了冲积河道平均(对流量)糙率,它相当于水库的平衡糙率。⑪提出了动床糙率按 Fr 数和粒径的插值方法。⑫介绍了水库淤积过程中糙率变化过程的插值公式及和下游河道冲刷过程中糙率变化的关系。

第十章为水库淤积控制,主要内容如下。①水库淤积控制包括库容淤积控制、变动回水区的航道控制、淤积引起洪水水位抬高的控制、坝前泥沙控制以及下游河床冲淤控制。本章仅阐述后三种控制。②淤积物引起洪水抬高的控制,主要通过控制淤积的汛期水位(防洪限制水位)和洪水时的水位来控制,使洪水水位在一定库段不超过允许值。③给出了水面

线由三次曲线近似时控制任意点洪水位的方法。④坝区泥沙控制主要包括电站进沙控制、异重流排泄控制以及船闸上、下游引航道泥沙淤积与冲刷控制。坝区泥沙控制还涉及坝区河势。⑤异重流排泄设施要尽可能保证异重流畅泄,当大坝结构不许可时,至少要避免浑水水库形成,或形成后较易排出其中相当的部分。⑥利用泥沙悬浮高,控制明流排沙时进入水轮机的有害的粗颗粒,进而讨论漏斗对防止悬沙粗颗粒的作用。⑦介绍了我国利用枢纽布置防止悬移质特别是推移质的有效措施和典型工程。⑧提出了通航建筑物减淤清淤应注意的问题。⑨下游河道冲刷控制是根据下游河道冲刷或减淤和河床变形控制的要求提出水库出库条件,再由水库运用调度来解决。这首先涉及下游河道冲刷、水库出库含沙量及级配,以及它们与水库淤积之间的关系。根据实际资料和数学模型研究结果,以小浪底水库和三峡水库为例给出了水库淤积与下游河道冲刷的关系。⑩论述了下游河道造床流量变化、人造洪峰及水库拦粗排细的作用。

第十一章为水库长期使用,主要内容如下。①水库长期使用是在总结大量水库淤积的正反两方面的经验的基础上提出的一种控制水库库容淤积最有效的水库运用措施,是我国水利科技工作者的创造。②水库长期使用的原理是将它看成两个水库,即排沙期的水库与正常蓄水位以下的水库。在水库淤积平衡后前者已淤死,故能排走全部来沙,而且还能冲走前期淤积物;后者则有相当库容,会发生淤积。长期使用水库没有违背水库淤积的基本规律,恰恰利用这个规律来改造水库。③论证了长期使用水库对于年调节水库在技术上的可行性、在经济上的合理性。④给出了长期使用水库的最终保留的静库容确定的方法,包括平衡纵横剖面保留面积等。⑤研究推移质淤积部位及其淤积长度,以及下延上翘的发展和淤积量确定方法。⑥以三峡水库长期使用为例,对比了利用它的有关参数的概算方法与数学模型详细计算,表明两者十分符合。而概算方法更直观,更易表达其机理,以及和各参数之间的相互影响。

第十二章为变动回水区航道控制,主要内容如下。①从全局看,水库变动回水区航道是改善的,具体表现在当它处于回水范围时水深航宽都有大幅度增加,而当回水消失时,由于淤积导致河床可塑性增加,同时淤没了部分滩险,滩槽差有所加大,坡降略有减缓,水深有所加大,水流较平顺。②变动回水区航道在某些不利条件下也会有碍航现象,往往与下述五个条件有关:消落冲刷后期、坝前水位低、枯水流量、变动回水区下段、顺直宽浅河段。正是因为出现碍航点,常常必须上述几个条件的某种组合,其机遇是较小的。但是如果上述五个条件同时具备,碍航就较严重。③影响水库变动回水区航道的决定性因素是水库运用方式。对航道不利的运用方式是控制水库淤积的水位或防洪限制水位与正常蓄水位相近,死水位与枯水期的水位远低于防洪限制水位。④针对所述情况提出了航运控制调度,除控制淤积的防洪限制水位远低于正常蓄水位从而减少变动回水区淤积外,就是枯水期的水位远高于防洪限制水位而为航运控制水位,以加大变动回水区的水深,同时也减少变动区回水区的冲刷。春汛来临,流量加大后,再将水位降至防汛限制水位,这就是航运控制调度。它有明显的改善变动回水区航深的效果。⑤给出了航运控制调度运用的条件和决定航运控制水位的方法。

第十三章为水库下游河床演变的基本现象及水沙过程改变对河床变形的影响,其主要内容如下。①水库下游冲刷的特点:冲刷是明显的、系统的,冲刷距离长,含沙量及挟沙能力较天然河道均有大幅度降低,悬沙级配变粗等。②在水库下泄含沙量逐渐恢复时,下