

Density Current in Reservoir

水库

异重流

李书霞 张俊华 夏军强 等著
马怀宝 王艳平 郜国明



黄河水利出版社

水库异重流

李书霞 张俊华 夏军强 等著
马怀宝 王艳平 郜国明

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书集成与凝练了作者 20 年来对水库异重流所进行的滚动研究成果,分 3 篇对水库异重流基本规律、水库异重流模拟、水库异重流调度及塑造等成果进行了系统总结。本书关于工程的实例分析,多为解决黄河小浪底水库工程设计及调度运行中遇到的问题而进行的。

本书是一部涉及水力学、河流动力学、河流模拟技术等学科的科技专著,可供广大水利工作者、河流泥沙研究人员及大专院校有关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水库异重流/李书霞等著. —郑州:黄河水利出版社,
2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0633 - 4

I. ①水… II. ①李… III. ①水库泥沙 - 异重流 -
研究 IV. ①TV145

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 284483 号

组稿编辑:岳德军 电话:0371 - 66022217 E-mail:dejunyue@163.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:17.25

字数:400 千字

版次:2013 年 11 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2013 年 11 月第 1 次印刷

定价:45.00 元

前 言

水库异重流是由于入库浑水与库内清水之间的密度差异而发生的相对运动。20 世纪 50 年代初到 60 年代,我国对官厅、三门峡等水库异重流开展了大量观测与研究,与此同时,异重流相关专著相继出版,例如清华大学钱宁等《异重流》、中国水利水电科学研究院范家骅《异重流的研究和应用》等。韩其为的专著《水库淤积》,在异重流输沙规律、淤积与排沙及支流倒灌等方面,完成了由定性描述到定量表达,将异重流研究推向一个新的阶段。范家骅的《异重流与泥沙工程实验与设计》,对其 50 年来的异重流和泥沙工程科研成果进行了更为全面系统的梳理。

作为黄河治理开发的重要控制性工程——小浪底水库 2000 年投入运用,自 2001 年对异重流开展了较为系统的观测,积累了大量的实测资料。黄河水利科学研究院依托国家自然科学基金、“十一五”国家科技支撑计划、水利公益性行业科研专项等项目,在前人研究的基础上,通过对小浪底水库实测资料整理、二次加工及分析,以及水槽试验及实体模型试验,提出了可定量描述小浪底水库异重流排沙的临界指标,以及定量描述阻力、挟沙力、传播时间、干支流倒灌、异重流运行速度及排沙效果的表达式,对多沙河流水库物理模拟与数值模拟等方面开展深入研究,并将研究成果付诸黄河历次调水调沙塑造异重流与水库优化调度。本专著即为近年来,作者与相关研究人员围绕以小浪底水库异重流为主题所开展的基础研究、水库调度、水库模拟等方面的新进展。

本专著分为 3 篇 13 章,第 1 篇重点介绍水库异重流基本规律,包括异重流产生、异重流运动特性、异重流流速及含沙量垂向分布、异重流传播与输沙、异重流水库干支流倒灌、浑水水库排沙等。各章编写分工如下:绪言由张俊华编写,第 1 章由夏军强、谢志刚编写,第 2 章由马怀宝、谢志刚编写,第 3 章由蒋思奇、高幼华编写,第 4 章由李涛、张晓华编写,第 5 章由李昆鹏、谢志刚编写。

第 2 篇重点介绍水库异重流模拟,包括水库泥沙模型相似律,以及在此基础上开展的小浪底水库拦沙初期物理模型试验研究、小浪底水库水沙调度数学模型。各章编写分工如下:第 6 章由王艳平、张晓华编写,第 7 章由李书霞、高幼华编写,第 8 章由张俊华、石标钦编写,第 9 章由王艳平、高幼华编写,第 10 章由王婷、张晓华编写,第 11 章由夏军强、高幼华编写。

第 3 篇重点介绍水库异重流调度及塑造,包括自然洪水异重流调度与利用、人工异重流塑造与利用等。各章编写分工如下:第 12 章由郜国明、谢志刚编写,第 13 章由李书霞、石标钦编写。

本专著的研究与出版得到了国家自然科学基金项目(51179072、51309110)、水利公益性行业科研专项经费项目(200901015、200801024、201201080)的资助。黄河水利科学研究院小浪底水库研究中心与防汛所陈书奎、田治宗、张攀、于国卿、岳瑜素、邓宇、徐路凯、曾贺、王国栋、李远发、曲少军、梁国亭等参加了相关的研究工作,一并表示感谢。

作 者
2013 年 10 月

目 录

前 言	
绪 论	(1)
0.1 多沙河流水库淤积状况	(1)
0.2 水库异重流研究与排沙	(1)
0.3 本书的主要内容和研究进展	(4)
参考文献	(6)

第1篇 水库异重流基本规律

第1章 异重流产生	(11)
1.1 异重流产生机制	(11)
1.2 异重流运动方程	(14)
1.3 异重流潜入点判别条件	(20)
第2章 异重流运动特性	(23)
2.1 异重流有效重力、惯性力	(23)
2.2 异重流运动阻力	(24)
第3章 异重流流速及含沙量垂向分布	(30)
3.1 异重流交界面	(30)
3.2 异重流流速垂向分布	(31)
3.3 异重流含沙量垂向分布	(39)
第4章 异重流传播与输沙	(42)
4.1 异重流传播时间	(42)
4.2 异重流挟沙力	(45)
4.3 异重流不平衡输沙	(50)
4.4 异重流持续运动	(51)
第5章 浑水水库	(57)
5.1 高含沙水流基本特性	(57)
5.2 高含沙浑水特性试验	(58)
5.3 浑水水库沉降	(69)
参考文献	(75)

第2篇 水库异重流模拟

第6章 水库泥沙模型相似律	(81)
6.1 水库泥沙模型相似律研究概述	(81)

6.2	异重流运动相似条件推导	(85)
6.3	水库泥沙模型相似律	(89)
第7章	水库模型设计及验证	(94)
7.1	模型设计	(94)
7.2	模型验证	(97)
第8章	小浪底水库拦沙初期物理模型试验	(121)
8.1	模型试验条件及方案	(121)
8.2	模型试验结果	(125)
第9章	小浪底水库拦沙初期数值模拟	(152)
9.1	基本方程	(152)
9.2	关键问题研究及处理	(155)
9.3	数值方法	(161)
9.4	模型验证	(162)
9.5	数值模拟结果	(163)
第10章	小浪底水库拦沙初期实况及其对预测成果验证	(166)
10.1	水库排沙特性	(166)
10.2	库区淤积形态及库容变化	(174)
10.3	预测成果合理性	(178)
10.4	小 结	(180)
第11章	小浪底水库水沙调度数学模型	(182)
11.1	模型框架	(182)
11.2	模型中关键问题处理	(186)
11.3	模型率定	(189)
11.4	模型验证	(193)
11.5	水库调度指标	(198)
参考文献		(202)

第3篇 水库异重流调度及塑造

第12章	自然洪水异重流调度与利用	(205)
12.1	2002年黄河调水调沙	(205)
12.2	2003年黄河调水调沙	(208)
第13章	人工异重流塑造与利用	(212)
13.1	2004年黄河调水调沙	(212)
13.2	2005年黄河调水调沙	(222)
13.3	2006年黄河调水调沙	(241)
13.4	2008年黄河调水调沙	(248)
13.5	2011年黄河调水调沙	(257)
参考文献		(262)
主要符号说明		(263)

绪 论

0.1 多沙河流水库淤积状况

目前,世界上共建有各类水库 4.3 亿座,我国有 8.7 万多座。这些水库给自然和社会经济的各个方面都带来了巨大的影响。然而伴随而来的是水库泥沙淤积问题,水库淤积严重缩短了水库寿命,降低了水库效益,使得水库防洪、灌溉、发电、给水、航运、水产等除害兴利综合利用效益不能充分发挥,甚至使水库完全失去调节能力。在多沙河流上,由于泥沙含量极高,水库淤积发展迅速,问题更为严重。

河流上修建水库后,库内即发生淤积。大量资料表明,不论大、中、小型水库,即使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^[1]。

美国在 20 世纪 50 年代末期,曾对 1 100 座水库的淤积情况进行了调查。Gottschalk 选择了其中 66 座有代表性的水库,按地区分别进行统计^[2]。统计结果发现,在 22 年内,66 座水库库容平均损失率为 15.6%,年平均损失率达到 0.71%,其中以北部大平原的水库淤积最为迅速,年平均损失率为 1.28%。到了 20 世纪 70 年代末期,每年大约有 12 亿 t 的泥沙淤积在水库里。

苏联的中亚细亚一带,水库淤积也甚为严重。锡尔河上的法尔哈德水库,库容 2.5 亿 m^3 ,运用 12 年,损失库容达 87%;另一库容 1 亿 m^3 的水库,仅运用 9 年,便被淤满^[3]。

我国西北和华北地区很多河流以高含沙而驰名于世,在这些河流上建坝以后,水库的淤积速度更是十分惊人。在不到 14 年内,20 座水库平均损失库容 31.3%,年损失率达到 2.26%,为美国水库淤积速度的 3.2 倍^[4]。据不完全统计,至 1990 年(有些统计至 1987 年),在黄河干支流上水库总淤积量约为 115.5 亿 m^3 ,其中大型水库淤积量约为 96 亿 m^3 ,中型水库淤积量约为 14 亿 m^3 。大部分大型水库的淤积十分严重,至今许多水库的淤积甚至超过总库容的一半以上^[5]。

水库泥沙淤积侵占了有效库容,降低了水库的调节能力,减少了工程的效益,甚至影响了水库对下游的防洪作用和大坝自身的防洪安全。控制水库泥沙淤积和长期保持多沙河流水库有效库容已经成为在多沙河流上修建水库必须解决的问题。

0.2 水库异重流研究与排沙

挟沙水流进入蓄有清水的水库,在满足一定的条件时会潜入清水下面沿库底向坝前流动,这种因密度差异而发生的相对运动即为异重流。若异重流具有足够的能量即可运行至坝前,并通过底层泄水洞排出库外。水库异重流可以在大量蓄水条件下排沙,既能保

持较高的兴利效益,又能减少水库淤积、延长水库使用寿命,因此异重流是水库重要的排沙方式。

异重流的发现由来已久,早在 19 世纪末期,瑞士的一些科学家注意到莱茵河和罗恩河流入康斯坦湖和日内瓦湖以后,浑浊寒冷的河水并没有和澄清温暖的湖水掺混,而是潜入湖底成一股潜流^[6]。异重流问题真正受到关注是 20 世纪 30 年代。1935 年美国科罗拉多河上胡佛坝落成蓄水,回水长度达 110 km。当上游降暴雨,河水挟带大量泥沙进入水库,随后不久在水坝的泄水孔突然有浑浊的泥水流出,而水库内始终清澈可见,表明异重流可以挟带大量泥沙历经长距离而不与清水掺混,并通过合理调度排出水库。自此以后,水库异重流问题开始引起人们广泛关注,各方面致力于这一问题的研究颇不乏人。20 世纪 40 年代开始,美国分别在水利实验室和水库中对异重流进行了试验与观测。20 世纪 50 年代初,我国对异重流进行了大量的原型观测研究。1953 年汛期,官厅水库上游发生高含沙大洪水,库区发生异重流并排沙出库。此后官厅水库开始进行系统的观测试验,长达 20 多年^[7]。这些系统的观测资料不仅为黄河三门峡水利枢纽规划设计提供了科学依据,也为长江流域、辽河流域等诸多水库的规划设计提供了宝贵资料。20 世纪 50 年代后期到 60 年代,我国相继兴建了三门峡、巴家嘴、汾河、红山、刘家峡等大型水库,相应开展了异重流观测,积累了大量的实测资料,为水库异重流排沙减淤、水库运用与管理提供了重要依据。自 2001 年后黄河小浪底水库开始了较为系统的异重流观测,积累了大量的实测资料^[8]。

实测资料显示,异重流形成和运动的影响因素很多,多沙河流水库水流含沙量较高且泥沙颗粒较细,高含沙异重流运动特征有别于一般异重流,而且异重流到达坝前以后不同规模的泄流设施或不同的调度过程,水库排沙比也有很大差别。一般情况下,当入库洪水过后,异重流无足够的后续动力而失去持续运行条件,浑水中悬浮的泥沙就地沉降。异重流排沙时间总是小于洪峰持续时间。然而对泄流规模比较小的巴家嘴水库则相反,例如 1971 年 4 月巴家嘴水库产生高含沙异重流,异重流运行到达坝前以后,受泄流能力的制约不能及时排出而停滞在坝前形成浑水水库。由于浑水水库中悬浮的泥沙含量很高,颗粒又比较细,浑水水库与库内清水的交界面以极其缓慢的速度徐徐下沉,使得浑水水库中悬浮的泥沙继续排出库外,巴家嘴水库的异重流排沙时间与洪峰持续时间比增加到 1.5~6.9。对回水较短、蓄水较少的水库,水库排沙比往往较高,例如黑松林水库,库长 3 km,当入库水流含沙量为 370 kg/m^3 的高含沙水流形成异重流之后,其排沙比达 91%。还有水库会形成所谓“冲刷型”异重流,例如三门峡、小浪底水库,在入库流量较大且水库控制水位较低时,在库区上段产生冲刷,在水库回水区形成异重流,水库排沙比可大于 100%。

鉴于异重流问题的重要性、复杂性及工程实际的需求,围绕水库异重流的研究相继开展。中国水利水电科学研究院于 1956 年开始进行异重流研究,为三门峡水利枢纽规划设计提供了科学依据^[6,9]。1980 年陕西省水利科学研究所进行了高含沙异重流试验研究。1983 年黄河水利科学研究院在室内水槽做了高含沙异重流研究,并对巴家嘴水库高含沙异重流进行了全面系统的分析研究。与此同时,相关专著陆续出版,例如清华大学钱宁等的专著《异重流》^[6]、中国水利水电科学研究院范家骅的专著《异重流的研究和应用》^[9],

黄河水利科学研究院焦恩泽的专著《黄河水库泥沙》^[10]等。此外,韩其为在其专著《水库淤积》中对水库淤积与河床演变等方面做了系统研究,在水库淤积方面基本完成了将其由定性描述到定量研究的过渡,尤其在异重流淤积及支流倒灌研究方面更为深入^[1]。范家骅在《异重流与泥沙工程实验与设计》对其 50 年来的泥沙异重流和泥沙工程科研成果进行了全面的梳理,主要包括异重流水力学、泥沙工程设计中涉及异重流淤积问题、泥沙沉淀和饱和含沙量水槽试验的研究成果^[11]。此外,国内外众多科研人员在水库异重流研究方面取得了大量成就,重点包括以下几个方面:

(1) 水库异重流潜入条件。范家骅等^[9,11]不少学者从非均匀异重流方程出发进行分析,给出了异重流的潜入条件计算方法。芦田和男^[12]通过推导动量方程求出异重流形成条件的判别准则。Akiyama 与 Stefan^[13]导出缓坡和陡坡不同的潜入水深公式。曹如轩等^[14]认为,随着含沙量增大,流体黏性增大,流态发生改变,潜入点数相应减小。Basson 基于最小水流功率原理,认为在水库的潜入点处,异重流的水流功率应等于或小于来流的功率^[15]。韩其为认为潜入点的水深必须大于异重流正常水深,否则潜入不成功^[1]。李元亚等通过理论分析,给出了考虑底坡、阻力系数等因素的统一的潜入点佛汝德数的表达式^[16]。

(2) 异重流运动。异重流的运动主要是通过惯性力和有效重力的相互作用引起的,阻力起关键的作用。Keulegan 借层流边界层的概念,得到阻力系数、异重流速度、密度、黏滞系数相关的交界面阻力表达式^[17]。钱宁、万兆惠通过对二维异重流进行力学分析推导后,得到层流异重流的阻力作用定律^[18]。范家骅^[11]提出了有效入库水量的概念,概化了异重流持续运动的时间过程。张瑞瑾^[19]、韩其为^[1]定性给出了异重流持续运行的条件。韩其为提出异重流排沙含沙量与级配计算式^[1]。詹义正等^[20]从悬移质运动一般扩散方程出发,推导出一维非饱和非均匀沙异重流含沙量的沿程分布的计算公式。

(3) 水库浮泥层与浑水水库输移规律。当异重流能量不足以克服沿程阻力损失,则停滞或以极低速度缓慢前行,此时的浑水体经过密实作用形成具有高含沙量悬浮体称之为水库浮泥层。水库浮泥层或进一步密实转化为淤积物,或在后续洪水形成的异重流作用下重新起动,且与之叠加一并前行。浑水水库是当异重流运行至坝前不能及时排出聚集而成。水库浮泥层与浑水水库不仅涉及该场次洪水排沙,而且对接踵而来的后续洪水泥沙输移产生影响。浮泥的研究始于 20 世纪 50 年代,Inglis 和 Allen^[21]在研究 Thames 河的泥沙运动时首次使用了浮泥 (FluidMud) 这一名称。Parker 和 Hooper 采用了“高浓度水底泥层”(Hyper-concentrated Benthic Layers) 这一名称替代了浮泥^[22]。钱宁、万兆惠认为,浮泥形成的必要条件是其悬沙落淤率大于其沉积率。徐建益认为,浮泥形成的条件:一是细颗粒泥沙多;一是水动力条件相对较弱。大多数认为浮泥一般属于宾汉流体运动特性,也有部分人认为浮泥具有黏弹塑性的特征。多数学者采用容重或含沙量来定义浮泥,认为当浮泥的流动性明显消失,流变参数随浮泥容重的增大而明显加大时的浮泥特性为浮泥的上界,当泥浆由牛顿流体转为宾汉流体时的浮泥特性为浮泥的下限。韩其为研究了细颗粒泥沙淤积体,提出以宾汉极限切应力作为水下浆河与异重流的判别指标^[23]。Rocio 和 Imberger 进行了类似于水库两个洪水过程底部异重流相互作用的试验,认为当后期浑水异重流比重等于水库浑水比重,异重流对前期浑水有推动作用^[24]。

20 世纪 70 年代清华大学给出了浑水水库浑液面沉降过程的经验公式,并对浑水水库排沙过程进行了初步的探讨^[25]。陈景梁等论述了浑水水库特性和排沙规律,提出了浑水水库排沙计算的数学模型和物理模型试验方法^[26]。凌来文等提出了恒山浑水水库排沙计算方法^[27]。赵克玉建立了浑水水库排沙的基本方程,并研发了浑水水库排沙数学模型^[28]。刘树君等在一维模型中引入了孔口出流的概念,对浑水水库库区进行了分层计算^[29]。韩其为等分析了小浪底水库泥沙分选规律,给出了异重流畅流排沙、浑水水库排沙以及两者结合的排沙效果^[30]。

(4) 水库异重流数值模拟。范家骅早在 1963 年就曾提出过异重流的简单计算方法^[31]。吴德一^[32]、韩其为对一维浑水异重流的计算方法进行了改进和提高。王光谦等引入泥沙扩散方程建立了双层密度平均的异重流平面二维数学模型^[33]。曹志先建立了立面二维非耦合悬浮流模型,并将之应用于水库坝前冲刷漏斗动平衡形态及相应水沙流动特性的数值模拟^[34]。彭杨采用变密度流基本方程和混合有限分析法,求解了突扩边界下的异重流潜入运动^[35]。夏军强、王光谦利用空间概念上的分步法,对剖面二维悬移质泥沙输移方程,提出两种不同的计算格式^[36]。冯小香、张小峰基于 σ 坐标变换和 SIMPLE 算法,建立了立面二维悬浮物分布数学模型^[37]。

以上成果为水库异重流调度奠定了坚实基础,并极大地促进了学科进步。

黄河小浪底水库 2000 年投入运用使水库异重流研究进入一个新的阶段。小浪底水库位于黄河中游下段,在黄河治理与开发中具有重要的战略地位。小浪底水库入库水沙条件复杂多变,众多支流入汇地形复杂,水库调水调沙调度相对频繁,使得水库异重流问题更为复杂,促使科技人员进一步深入研究。小浪底水库运用以来,水库下段均处于蓄水状态,当汛期黄河中游降雨产沙时,大量泥沙涌入小浪底水库后,往往形成异重流或浑水水库排沙。随着库区淤积三角洲向坝前推进,异重流潜入点不断下移,水库排沙比呈增大趋势。小浪底水库运用不仅对自然洪水形成的异重流进行了优化调度,而且实现了人工塑造异重流的调度。所谓塑造异重流,是在黄河中游未发生洪水的情况下,通过黄河中游万家寨、三门峡与小浪底水库联合调度,充分利用万家寨、三门峡水库汛限水位以上水量泄放的能量,冲刷三门峡水库非汛期淤积的泥沙与堆积在小浪底库区上段的泥沙,在小浪底库区形成异重流并排沙出库,对减少三门峡及小浪底水库泥沙淤积是有利的。黄河水利委员会在 2004 年以来历年汛前的调水调沙过程中,在不同的来水来沙条件及河床边界条件下,均成功地塑造出异重流并实现排沙出库。在减少水库淤积的同时,深化了对异重流运动规律认识。

0.3 本书的主要内容和研究进展

0.3.1 水库异重流基本规律

系统地总结了水库异重流的研究现状,针对多沙河流水库异重流形成及输移过程中的基本运动特性从基础理论和实际应用两个层面开展了研究,提出了多沙河流水库异重流的潜入条件和持续运动条件;建立异重流交界面阻力、流速垂向分布和挟沙力的表达

式;分析了浑水水库的沉降特性等。

0.3.2 多沙水库泥沙动床模型相似理论及模型设计

在分析总结以往水库模型相似理论和设计方法的基础上,广泛地吸取模型相似理论和设计方法的原理和经验,以及泥沙运动力学和河床演变学的最新成果,针对黄河含沙量变幅大、河床冲淤变化迅速,以及水库排沙方式的多样性(明流、异重流等)等特点,提出了较为完善的水库泥沙动床模型设计方法;基于非恒定异重流运动方程等提出了异重流潜入相似条件、基于非恒定二维非均匀条件下的扩散方程导出异重流挟沙相似及连续相似条件;将异重流潜入相似条件、异重流挟沙相似及连续相似条件与水流、泥沙运动及河床变形等模型相似条件相结合,构成完整的多沙河流水库模型相似律。

利用三门峡水库和小浪底水库的实测资料进行了系统、科学的验证试验,可以基本满足在不同条件下河床冲刷相似和淤积相似,同时满足水库明流排沙和异重流排沙相似,可以保证试验成果的可靠性。

0.3.3 小浪底水库拦沙初期不同运用方式的试验研究

小浪底库区物理模型试验研究了水库不同运用方式下库区泥沙运动规律、排沙特征、河床纵横剖面形态及库容变化的影响。模型试验得出的主要结论及认识,不仅为选择水库最优运用方式提供了必要的科学依据,而且证明了小浪底水库投入运用后的实测资料的可靠性。

0.3.4 水库异重流数值模拟

建立了小浪底水库准二维数学模型,进行小浪底水库运用初期1~5年两种调节方案计算,在库区淤积形态及过程、水库排沙特性等方面,取得了与小浪底水库实体模型试验相近的结果,两者起到了相互印证、相互补充的作用。

建立了小浪底水库水沙调度数学模型,进行黄河汛前调水调沙小浪底水库异重流调控方案计算,提出了可定量且能直观地反映小浪底水库排沙的计算公式和便于调控的水库异重流调度指标。

0.3.5 水库异重流的研究及应用

利用上述异重流研究成果,并依据当时的水沙条件及边界条件,制订2002~2011年的调水调沙异重流调度、塑造及排沙方案,并在调水调沙实施过程中得到应用与检验。黄河历次汛前调水调沙,通过万家寨、三门峡与小浪底水库联合调度,成功地塑造出异重流并排沙出库,实现了减少水库淤积及调整库区淤积形态的目的。

参 考 文 献

- [1] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] P. G. Reservoir Sedimentation, in Hand Book of Applied Hydrology, ed. [M]. By V T: Chow, Mc-Graw-Hill Book Co., 1964: 37.
- [3] 水利电力部技术委员会. 关于世界坝工建设中几个主要问题的发展概况[J]. 水利电力技术, 1964(12):40-46.
- [4] 钱宁,戴定忠. 中国河流泥沙问题及其研究概况[C]. 北京:光华出版社,1980.
- [5] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州:黄河水利出版社,1996.
- [6] 钱宁,范家骅,曹俊. 异重流[M]. 北京:水利出版社,1957.
- [7] 侯晖昌,焦恩泽,秦芳. 官厅水库 1953 ~ 1956 年异重流资料初步分析[J]. 泥沙研究,1958(2):70-94.
- [8] 张俊华,陈书奎,李书霞,等. 小浪底水库拦沙初期水库泥沙研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2007.
- [9] 范家骅. 异重流的研究与应用[M]. 北京:水利电力出版社,1959.
- [10] 焦恩泽. 黄河水库泥沙[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004.
- [11] 范家骅. 异重流与泥沙工程实验与设计[Z]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [12] Ashida K. (芦田和男). How to predict reservoir sedimentation[C]//河流国际泥沙学术会议讨论会论文集,第二卷. 北京:光华管理出版社, 1980:821-850.
- [13] Akiyama J, Stefan H G. Plunging Flow into a Reservoir[J]. Theory. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 1984,110(4): 484-499.
- [14] 曹如轩,任晓枫,卢文新. 高含沙异重流的形成与持续条件分析[J]. 泥沙研究,1984(2):1-10.
- [15] Basson, G. R., Rooseboom, A. Dealing with Reservoir Sedimentation South African Water Research Commission Publication[J], 1998.
- [16] Yuanya Li, Junhua Zhang, Huaibao Ma. Analytical Froud number solution for reservoir density inflows [J]. Journal of Hydraulic Research,2011,49(5):693-696.
- [17] Keulegan, G. H., "Laminar Flow at the Interface of Two Liquid[J]. Res. Nat. Bureau of Standards, 1977,32:303-327.
- [18] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学技术出版社,1983.
- [19] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫,等. 河流泥沙动力学[M]. 北京:水利电力出版社,1989.
- [20] 詹义正,黄良文,赵云. 异重流非饱和和非均匀沙含沙量的沿程分布规律[J]. 武汉大学学报(工学版),2003,36(2):6-9.
- [21] Inglis, C. C. and Allen, H. H., The regimen of the Thames Estuary as affected by currents, salinities and river flows [C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Maritime and Waterways Engineering Division Meeting, 1957(7): 827 - 879.
- [22] Parker, W. R. and Hooper, P. M.. Criteria and methods to determine navigable depth in hyper-concentrated sediment layers[C]//Proceedings of Hydro - Port'94, International Conference on Hydro - Technical Engineering for Port and Harbour Construction, October, Yokosuka, Japan, 1994, 1211-1224.

- [23] 徐建益,袁建忠. 长江口深水航道建设中的浮泥研究及述评[J]. 泥沙研究,2001(3):74-81
- [24] Rocio Fernandez, R. and Imberger, J. Time-Varying Underflow into a Continuous Stratification with Bottom Slope[J]. Hydraul. Eng. 2008, 134(9):1191-1198.
- [25] 陕西省水利科学研究所河流研究室,清华大学水利工程系泥沙研究室. 水库泥沙[M]. 北京:水利电力出版社,1979.
- [26] 陈景梁,付国岩,赵克玉. 浑水水库排沙的数学模型及物理模型试验研究[J]. 泥沙研究,1988(1):77-86.
- [27] 凌来文,郭志刚,李新虎,等. 恒山浑水水库排沙计算方法研究[J]. 泥沙研究,1991(4):47-52.
- [28] 赵克玉. 浑水水库排沙数学模型的研究[J]. 西北水资源与水工程,1994(4):59-63.
- [29] 刘树君,付健,陈翠霞. 水库异重流和浑水水库排沙数值模拟技术研究[J]. 人民黄河,2012,34(12):30-31.
- [30] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [31] 范家骅,沈受百,吴德一. 水库异重流的近似计算[C]//水利水电科学研究院. 科学研究论文集第2集. 北京:中国工业出版社,1963:34-44.
- [32] 吴德一. 关于水库异重流的计算方法[J]. 泥沙研究,1983(2):54-63.
- [33] 王光谦,周建军,杨本均. 二维泥沙异重流运动的数学模型[J]. 应用基础与工程科学学报,2000(8):52-60.
- [34] 曹志先,谢鉴衡,魏良琰. 水库坝前冲刷漏斗平衡形态的数学模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑),1994(5):617-624.
- [35] 彭杨,李义天,槐文信. 异重流潜入运动的剖面二维数值模拟[J]. 泥沙研究,2000(6):68-75.
- [36] 夏军强,王光谦. 剖面二维悬移质泥沙输移方程的分步解法[J]. 长江科学院院报,2000(2):14-17.
- [37] 冯小香,张小峰,崔占峰. 垂向二维非恒定流及悬浮物分布模型研究[J]. 水科学进展,2006(4).

第 1 篇 水库异重流 基本规律

