

HUANGHE GANLIU SHUIKU

DUI HEDAO SHENGTAI XITONG DE YINGXIANG JI

SHENGTAI DIAODU

黄河干流水库

对河道生态系统的影响及生态调度

蒋晓辉 何宏谋 曲少军 王洪铸 王义民 等著



黄河水利出版社

黄河干流水库对河道生态 系统的影响及生态调度

蒋晓辉 何宏谋 曲少军 王洪铸 王义民 等著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书在对黄河干流水生态系统取样调查的基础上,评估了黄河干流水库对河流水生态系统的影响,研究了水库运行对河流水沙过程、河道生态系统及河道形态的负面影响,确定了河道生态系统修复目标;计算了维持水生生物生存繁衍需要的径流条件、黄河下游河道湿地生态需水、乌梁素海和黄河河口近海生态需水,提出了维持河道生态系统良性循环需要的径流条件;通过开展已建工程合理生态调度模式研究,建立了黄河干流中长期水库生态调度模型,提出了水库生态调度方案,并建立了权衡水库生态调度经济社会效益与生态效益之间关系的评估方法和指标体系。

本书可供从事水文水资源、生态环境等相关专业的科研和管理人员、高等院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河干流水库对河道生态系统的影响及生态调度/
蒋晓辉等著. —郑州:黄河水利出版社,2012. 1
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0187 - 2

I. ①黄… II. ①蒋… III. ①水库 - 影响 - 黄河
流域 - 生态系统 - 研究 IV. ①X321. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 269634 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwp@126.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:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:18.25

字数:420 千字

版次:2012 年 1 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2012 年 1 月第 1 次印刷

定价:49.00 元

前 言

截至2007年底,黄河干流已建、在建水利水电工程28座,总库容697.2亿 m^3 ,总装机容量20 942万kW。黄河支流已建成大、中、小型水库2 600多座,总库容130多亿 m^3 。上述水利工程的兴建,为开发利用黄河水资源提供了重要的基础设施,在抗御旱、涝、洪、碱等自然灾害,工农业及城乡生活供水,发电,调水调沙和改善生态环境等方面发挥了显著作用,产生了巨大的社会效益和经济效益。然而,兴建水利水电工程通常会产生诸多的生态环境问题,水库的修建往往会造成上下游流域水文过程深刻而剧烈的变化,改变水流的自然循环,造成泥沙淤积和水温升高等问题,改变河道和冲积平原的生物和物理特征,减弱了河口的造陆过程,破坏全流域的水分配和水生态平衡,破坏河流以及地下水的连续性,从而严重地干扰和改变流域生态系统。

近年来,对于水资源开发利用引起的河流生态环境问题已逐渐引起了人们的重视,人们意识到,要实现河流的可持续性开发,必须在开发的同时保护河流,维护河流健康、建设生态环境友好型水利工程已成为共识。

鉴于以上认识,在水利部公益性行业专项(项目编号:2007SHZ1-19)的资助下,本书以黄河干流河道生态系统为研究对象,分析水库对生态系统的影响,确定河道生态系统与水沙过程响应关系,明确河流生态目标,探讨水库生态调度模式,提出一个满足各方面需求的多目标生态调度方案,这对于建设生态友好型水库、维持黄河健康生命有一定的现实意义和科学意义。项目由黄河水利科学研究院承担,中国科学院水生生物研究所和西安理工大学作为项目的协作单位,项目组成员由水生态、泥沙、水文水资源和水资源系统工程等不同学科的人员组成。项目参与单位和主要完成人为:黄河水利科学研究院的蒋晓辉、何宏谋、曲少军、张文鸽、付新峰、申冠卿、谷晓伟、蔡大应、侯素珍、王平、李昭悦、殷会娟、李皓冰、李恩宽、张凤燃、黄葵、陈丽、杜凯、邓春蕾、杨文丽、章博、程春晓等,中国科学院水生生物研究所的王洪铸、王海军、茹辉军、赵伟华、沈亚强、王勇、张晓可等,西安理工大学的王义民、张洪波、黄强、畅建霞等。项目启动以来,项目组通过文献检索、实地采样调研,获得黄河水生态系统的第一手资料和数据,项目开展过程中先后进行了数次咨询和研讨,为项目的顺利完成奠定了基础。

本书是在项目研究成果的基础上撰写而成的,项目和书稿的完成是各位成员共同努力的结果。各章编写分工如下:第1章由蒋晓辉、何宏谋编写,第2章由蔡大应、王洪铸、张文鸽、王海军编写,第3章由张文鸽、曲少军、王洪铸、王平、王海军编写,第4章由王义民、张文鸽、张洪波、黄葵编写,第5章由蒋晓辉、王洪铸、殷会娟、陈丽编写,第6章由蒋晓辉、张凤燃、邓春蕾、黄葵、杜凯编写,第7章由付新峰、蔡大应、谷晓伟、殷会娟、陈丽编写,第8章由谷晓伟、李昭悦、章博、李皓冰、程春晓编写,第9章由王义民、张洪波、何宏谋、黄葵编写,第10章由蒋晓辉编写。全书由蒋晓辉、何宏谋统稿。

本项目在完成过程中,中国科学院地理科学与资源研究所刘昌明院士、黄河水利委员会刘晓燕副总工、澳大利亚 Griffith 大学 Angela Arthington 教授和 Fluvial Systems Pty Ltd 的 Chris Gippel 博士给予了很多技术指导,在此深表感谢。

随着研究工作的深入,我们深刻认识到黄河水生态系统是一个跨越不同自然带、气候带的复杂的巨系统,水库生态调度涉及自然、经济和社会等多个领域,水利工程对河道水生态系统的影响非常复杂,水库建立和运行影响到河流生态系统的各个方面,实施生态调度也是一个复杂的决策过程。由于生态系统对水文情势的响应具有复杂性和不确定性的特点,想要通过生态调度一次性解决所有的河流生态问题是不可能的。不当的水库生态调度决策可能会产生下述两种危害之一,要么生态配水太少,继续恶化生态系统的健康;要么人类配水太少,影响人类社会经济的发展。因此,水库生态调度过程应该被看做是一个不断修正的过程,每一次水库生态调度的实施都应被看做是一次试验,通过对试验的监测和评估获取经验,以便不断修改先前的决策,使以后的决策更科学。这是一种在实践中学习的思想,通过试验、评估、修正、再试验、再评估、再修正不断循环递进的过程来实现对未知事物的理解。

黄河干流水库生态调度的研究刚刚起步,水生态资料比较缺乏,本书研究虽然取得了一定的成果,但尚存在很多不足之处,需要在试验、评估、修正、再试验、再评估、再修正不断循环递进的过程中进一步完善。限于研究者的水平和其他客观原因,书中难免存在许多不足甚至纰漏,敬请读者批评指正。此外,书中对于他人的论点和成果都尽量给予了引证,如有不慎遗漏之处,恳请相关专家谅解。

作 者

2011 年 9 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 黄河干流控制性工程及作用	(1)
1.2 研究的必要性	(7)
1.3 国内外研究进展	(8)
1.4 本书的主要内容及研究思路	(15)
第 2 章 黄河干流生态系统概况	(18)
2.1 黄河干流生境概况	(18)
2.2 黄河干流水生态系统现状调查	(19)
2.3 黄河河道基本特征	(34)
2.4 黄河的湿地及变化状况	(38)
2.5 黄河干流水生态分区	(40)
2.6 小 结	(45)
第 3 章 黄河干流水库对河道生态系统的影响	(46)
3.1 水库对河流生态系统的影响机制	(46)
3.2 水库对黄河干流生态系统水文要素影响分析	(47)
3.3 水库运用对河道冲淤和主槽过流能力的影响	(77)
3.4 黄河干流水库对下游河道的生态学效应及其作用机制	(98)
3.5 小浪底水库运行对黄河三角洲湿地的影响分析	(108)
3.6 水库对河流水质可恢复性的影响	(114)
3.7 水库对河流生态系统的影响评价	(118)
3.8 小 结	(123)
第 4 章 黄河干流河道生态系统修复目标	(125)
4.1 黄河干流河道生态系统修复目标	(125)
4.2 河流生态需水与生态恢复目标	(130)
4.3 本研究生态需水计算方法的选择——流量恢复法	(130)
4.4 小 结	(132)
第 5 章 维持水生生物生存繁衍需要的径流条件	(133)
5.1 黄河干流不同河段保护鱼类的生态习性	(133)
5.2 黄河下游鱼类生态需水研究	(135)
5.3 黄河上中游鱼类生态需水研究	(143)
5.4 小 结	(147)

第 6 章 黄河下游湿地自然保护区生态需水	(148)
6.1 郑州黄河湿地生态需水	(148)
6.2 孟津黄河湿地生态需水	(155)
6.3 开封柳园口黄河湿地生态需水	(160)
6.4 结 论	(163)
第 7 章 乌梁素海生态需水研究	(164)
7.1 概 述	(164)
7.2 生态保护目标	(171)
7.3 生态需水量计算	(173)
7.4 黄河向乌梁素海生态补水条件分析	(178)
7.5 小 结	(184)
第 8 章 黄河口近海海域生态需水	(185)
8.1 概 述	(185)
8.2 黄河河口生态系统关键种及保护目标的界定	(190)
8.3 河口生态系统的限制因子识别及标准确定	(197)
8.4 黄河河口近海生态需水的计算	(204)
8.5 小 结	(206)
第 9 章 黄河干流水库生态调度	(207)
9.1 水库生态调度理论基础	(207)
9.2 黄河干流主要断面环境流量耦合	(214)
9.3 面向生态的河流水资源多目标调度模型建立	(217)
9.4 评估反馈体系	(219)
9.5 面向生态的梯级水库中长期调度求解及应用	(221)
9.6 梯级水库生态调度计算结果分析评价	(228)
9.7 小 结	(241)
第 10 章 研究成果及展望	(243)
10.1 主要研究成果	(243)
10.2 进一步需要解决的关键技术	(245)
参考文献	(246)
附 录	(253)
附表 A 浮游植物种类名录(2008 年调查结果)	(253)
附表 B 高等植物种类名录(2008 年调查结果)	(266)
附表 C C4 植物种类名录(2008 年调查结果)	(275)
附表 D 底栖动物种类名录(2008 年调查结果)	(277)
附表 E 鱼类种类名录(2008 年调查结果)	(281)

第1章 绪 论

1.1 黄河干流控制性工程及作用

《黄河治理开发规划纲要》在黄河干流龙羊峡以下河段规划布置了 36 座梯级工程,其中龙羊峡、刘家峡、大柳树、碛口、古贤、三门峡、小浪底等七座水库是控制性骨干工程,也是构成黄河水沙调控体系的主体。目前已建成包括龙羊峡、刘家峡、三门峡、小浪底等四座骨干工程在内的梯级工程 20 余座,这些工程按照设计运用方式运用,发挥了巨大的防洪、防凌、供水、灌溉、发电等综合利用效益。

1.1.1 黄河干流梯级工程布局

黄委 1997 年编制完成的《黄河治理开发规划纲要》,根据黄河水少沙多、水沙异源,上中下游除害兴利紧密联系、相互制约的客观情况,考虑经济社会发展和黄河治理开发的总体要求,贯彻“兴利除害,综合利用”的治河方针,在黄河干流的龙羊峡至桃花峪河段共布置了 36 座梯级枢纽工程,并明确提出龙羊峡、刘家峡、大柳树、碛口、古贤、三门峡和小浪底等七大控制性骨干工程构成黄河水沙调控体系的主体。七大工程总库容 920 亿 m^3 ,有效库容 470.5 亿 m^3 ,分别占黄河干流 36 座梯级总数的 91.3% 和 93.2%。黄河干流龙羊峡以下骨干梯级工程指标见表 1-1。

表 1-1 黄河干流梯级工程主要技术经济指标(龙羊峡以下河段)

序号	工程名称	建设地点	控制面积 (万 km^2)	正常蓄水位 (m)	库容 (亿 m^3)	有效库容 (亿 m^3)	最大水头 (m)	最大坝高 (m)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kWh)
1	★●龙羊峡	青海共和	13.1	2 600.0	247.0	193.5	148.5	178.0	1 280.0	59.4
2	○拉西瓦	青海贵德	13.2	2 452.0	10.00	1.5	220.0	250.0	4 200.0	102.2
3	●尼那	青海贵德	13.2	2 235.5	0.26	0.1	18.1	45.5	160.0	7.6
4	山坪	青海贵德	13.2	2 219.5	1.24	0.1	15.5	45.7	160.0	6.6
5	●李家峡	青海尖扎	13.7	2 180.0	16.50	0.6	135.6	165.0	2 000.0	60.6
6	●直岗拉卡	青海尖扎	13.7	2 050.0	0.15	—	17.5	42.5	192.0	7.6
7	●康扬	青海尖扎	13.7	2 033.0	0.22	0.1	22.5	39.0	283.5	9.9
8	●公伯峡	青海循化	14.4	2 005.0	6.20	0.8	106.6	139.0	1 500.0	51.4
9	●苏只	青海循化	14.4	1 900.0	0.25	0.1	20.7	44.0	225.0	8.8
10	○黄丰	青海循化	14.4	1 880.5	0.70	0.1	19.1	50.0	225.0	8.7
11	○积石峡	青海循化	14.7	1 856.0	4.20	0.4	73.0	88.0	1 020.0	33.6
12	大河家	青海循化	14.7	1 783.0	0.09	—	20.5	38.0	220.0	8.4
13	○寺沟峡	青海甘肃	14.7	1 748.0	1.00	0.1	25.7	54.0	240.0	9.7

续表 1-1

序号	工程名称	建设地点	控制面积 (万 km ²)	正常蓄水位 (m)	库容 (亿 m ³)	有效库容 (亿 m ³)	最大水头 (m)	最大坝高 (m)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kWh)
14	★●刘家峡	青海永靖	18.2	1 735.0	57.0	35	114.0	147.0	1 690.0	60.5
15	●盐锅峡	甘肃永靖	18.3	1 619.0	2.20	0.1	39.5	55.0	472.0	22.4
16	●八盘峡	甘肃兰州	21.6	1 578.0	0.50	0.1	19.6	33.0	252.0	11.0
17	河口	甘肃兰州	21.6	1 558.0	0.12	—	6.8	—	74.0	3.9
18	●柴家峡	甘肃兰州	22.1	1 550.5	0.16	—	10.0	16.0	96.0	4.9
19	●小峡	甘肃兰州	22.5	1 499.0	0.40	0.1	18.6	47.7	230.0	9.6
20	●大峡	甘肃兰州	22.8	1 480.0	0.90	0.6	31.4	71.0	324.5	15.9
21	○乌金峡	甘肃靖远	22.9	1 436.0	0.20	0.1	13.4	54.5	140.0	6.8
22	★大柳树	宁夏中卫	25.2	1 380.0	107.4	57.1	139.0	163.5	2 000.0	77.9
23	●沙坡头	宁夏中卫	25.4	1 240.5	0.27	0.1	11.0	37.6	120.3	6.1
24	●青铜峡	宁夏青铜峡	27.5	1 156.0	5.70	0.1	23.5	42.7	324.0	13.7
25	海勃湾	内蒙古海勃湾	31.1	1 076.0	4.10	1.5	9.9	14.0	60.0	3.1
26	●三盛公	内蒙古磴口	31.4	1 055.0	0.80	0.2	8.6	9.0		
1~26 小计					467.56	292.4			17 488.3	610.3
27	●万家寨	山西、内蒙古	39.5	977.0	9.0	4.5	81.5	90.0	1 080.0	27.5
28	○龙口	山西、内蒙古	39.7	898.0	1.80	0.7	36.2	48.0	420.0	13.0
29	●天桥	山西、陕西	40.4	834.0	0.70	—	20.1	47.0	128.0	6.1
30	★碛口	山西、陕西	43.1	785.0	125.7	27.9	73.4	143.5	1 800.0	43.6
31	★古贤	山西、陕西	49.0	645.0	165.7	47.7	119.6	199.0	2 100.0	71.0
32	甘泽坡	山西、陕西	49.7	425.0	4.4	2.4	38.7	94.0	440.0	13.0
33	★●三门峡	山西、河南	68.8	335.0	96.4	—	52.0	106.0	410.0	12.0
34	★●小浪底	河南	69.4	275.0	126.5	51	138.9	173.0	1 800.0	58.5
35	●西霞院	河南	69.5	134.0	1.45	0.3	14.4	43.0	140.0	5.8
36	桃花峪	河南	71.5	110.0	17.3	11.9	—	20.0	—	—
27~36 小计					548.95	146.4			8 318	250.5
1~36 小计					1 016.51	445.3			25 796.3	860.8

注：★为骨干工程，●为已建工程，○为在建工程。

1.1.2 黄河干流已建骨干水库的作用

黄河干流建成的龙羊峡、刘家峡、三门峡和小浪底四座骨干水利枢纽工程,按照设计的运用方式运用,在防洪(包括防凌)、减淤、工农业供水及发电等方面发挥了极为重要的作用,有力地支持了黄河流域及黄淮海平原地区的经济社会发展。

1.1.2.1 已建骨干工程的防洪作用

1)在黄河下游防洪中发挥的重要作用

三门峡水库建成后,黄河下游尚未发生超过 22 000 m³/s 的大洪水,但自 1964 年以来,三门峡以上地区曾六次出现流量大于 10 000 m³/s 的大洪水,三门峡水库削减洪峰,在一定程度上缓解了黄河下游防洪抢险的紧张局面,减轻了黄河下游的防洪负担,为黄河下

游几十年伏秋大汛不决口发挥了重要的作用。其中 1977 年 8 月 6 日发生了三门峡水库入库洪峰流量为 $15\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水,三门峡 8 月 7 日最大下泄流量 $8\,900\text{ m}^3/\text{s}$,削减洪峰流量 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$;1982 年 7 月 29 日花园口出现洪峰流量 $15\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水,由于三门峡水库滞洪削峰和其他分滞洪工程协同发挥作用,使这次洪水安全入海。

陆浑、故县水库建成后,与三门峡水库联合防洪调度运用,可减少下游花园口洪峰流量超过 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的出现机遇,使黄河下游的防洪标准由 30 年一遇提高到 60 年一遇,增加了黄河下游防洪调度的灵活性和可靠性。

小浪底水库建成后,通过与三门峡、陆浑和故县水库的联合调度运用,显著削减了黄河下游稀遇洪水,使花园口断面百年一遇洪峰流量由 $29\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 削减到 $15\,700\text{ m}^3/\text{s}$,千年一遇洪峰流量由 $42\,100\text{ m}^3/\text{s}$ 削减到 $22\,600\text{ m}^3/\text{s}$,接近花园口设防流量 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。由此可见,三门峡、小浪底、陆浑和故县水库的建设,对黄河下游防洪起到了重要作用,增强了堤防抗御大洪水的能力,大大减轻了黄河下游的防洪压力。

2) 在黄河上游防洪中的作用

黄河上游防洪主要是通过龙羊峡、刘家峡两库联合控制运用,保障防洪对象的安全度汛。龙羊峡水库正常蓄水位 $2\,600\text{ m}$,原始库容 247 亿 m^3 ,调节库容 193.5 亿 m^3 ,为多年调节水库,控制着黄河上游 65% 的水量和主要洪水来源,在黄河上游防洪中发挥着巨大的调蓄作用,通过水库对洪水的调节和控制,可以削减黄河上游洪峰流量 $3\,040\sim4\,500\text{ m}^3/\text{s}$,大大提高下游电站和城市的防洪标准。刘家峡水库总库容 57 亿 m^3 ,有效库容 41.5 亿 m^3 ,水库的建成投运后提高了兰州市及下游梯级电站的防洪标准。刘家峡水库按保障兰州市的防洪标准为百年一遇进行设计,通过刘家峡水库的防洪作用,使兰州市中山桥断面 100 年一遇的洪峰流量从 $8\,080\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量减少为不超过其安全泄量 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$,考虑区间洪水后,刘家峡水库下泄流量不超过 $4\,540\text{ m}^3/\text{s}$ 。同时通过刘家峡水库的防洪作用,可以使盐锅峡水电站 1 000 年一遇标准提高到 2 000 年一遇。目前,龙羊峡、刘家峡水库防洪运用还考虑在建电站工程的施工洪水要求。

1.1.2.2 已建骨干水库的防凌作用

1) 在黄河下游防凌中发挥的重要作用

历史上黄河下游凌汛灾害比较严重,据不完全统计,1883~1936 年 54 年间有 21 年凌汛期决口。1949 年至三门峡水库建成前,黄河下游曾有二次凌汛决口,造成了较大的凌汛灾害,1951 年 2 月 3 日发生在利津王庄,淹没村庄 91 个,受灾人口 7 万人,受灾面积 2.87 万 hm^2 ;1955 年 1 月 29 日发生在利津五庄,受灾人口 20.5 万人,受灾面积 5.73 万 hm^2 。

自从三门峡水库建成运用以来,由于三门峡水库改变了下游河道凌期的流量,水库下泄水温升高也影响黄河下游河段的冰情,不仅推迟封河时间,而且使下游封冻河段长度明显减少,封、开河冰塞、冰坝次数减少,大大地减轻了黄河下游的防凌威胁。自 1960 年至 2000 年的 40 年中,特别是下游凌汛严重的 1969 年、1970 年、1976 年、1977 年等年份,由于利用三门峡水库调节凌汛期河道水量,推迟了开河时间,避免了“武开河”的不利局面,安全度过凌汛期。水库建成后黄河下游再没有出现凌汛决口,在保障黄河下游的凌汛安全方面发挥了重要的作用。

小浪底水库运用后,在水库运用初期具有足够的防凌库容,对下游河道的流量进行更加直接的调节,出库水温比建坝前明显增高,缓解了黄河下游的凌汛威胁。2001年冬季,黄河下游气温较常年偏低,防凌形势严峻,在即将封河的关键时期,小浪底水库持续以 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量向下游补水,使封河形势得到缓解,开创了严寒之年下游不封河的先例。2002年凌汛期,在来水极枯、封河流量较小条件下,由于封冻期合理控泄,下游河道107 km封河河段开河平稳;2003年济南、北镇站1月上旬平均气温为1970年以来同期最低值,黄河下游出现两次封河、开河,最大封冻长度达330.6 km的严重凌情,封冻期小浪底水库控泄流量仅在 $120\sim 170\text{ m}^3/\text{s}$,实现了全线“文开河”。2004年12月至2005年2月下游凌汛期间,小浪底水库实际泄水21.06亿 m^3 ,各月平均流量分别为 $312\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $251\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $247\text{ m}^3/\text{s}$,有效缓解了凌汛形势。小浪底水库运用后的2001~2007年,凌汛期黄河下游年均封河长度129 km,仅为1950~2000年平均封河长度254 km的51%,河道易封易开,2005~2006年度凌汛期还出现了罕见的“三封三开”现象,大大减小了凌汛成灾的概率。

小浪底水库进入正常运用期后,仍可提供20亿 m^3 的防凌库容,三门峡水库可提供15亿 m^3 的防凌库容,通过合理控制下泄流量,减少凌汛期间河道槽蓄水量,减少开河时的凌峰流量,满足下游防凌减灾的需要。

2) 在黄河上游防凌中的作用

刘家峡水库建成运行以后,特别是1989年按《黄河刘家峡水库凌期水量调度暂行办法》进行凌汛期调度以来,刘家峡水库一是调节凌汛期水量,增大封河流量,提高了冰下过流能力,并使冰期河道保持比较平稳的流量过程,有效减轻了开河期凌情灾害。二是使刘家峡水库出库水温有所提高,部分河段不再封冻,并推迟了内蒙古河段流凌、封河日期,对缓解内蒙古河段的防凌压力、减轻凌汛灾害发挥了作用。

1.1.2.3 已建骨干工程的供水作用

1) 龙羊峡、刘家峡水库在黄河水资源优化配置中发挥了关键作用

第一,龙羊峡水库利用其多年调节性能,将丰水年的多余水量调至枯水年或特枯水年,补充枯水年全河水量之不足,实现年际间水资源的合理配置;第二,两水库拦蓄黄河汛期水量以补充枯水期水量之不足,提高了沿黄两岸的供水保证率,增加了上游梯级水电基地的发电效益。从水资源年内分配来看,龙羊峡、刘家峡水库一般6~10月蓄水,最大蓄水量达116亿 m^3 ,11月至翌年5月供水,最大供水量达56亿 m^3 ;从水资源年际配置来看,两水库年最大蓄水量达104亿 m^3 (2003年),年最大供水量为44.7亿 m^3 。由此看出,两水库的建设在黄河水量的统一调度和合理配置中发挥了重要作用。

2) 小浪底水库的建设在保证黄河不断流、提高黄河下游用水保证率等方面发挥了关键作用

小浪底水库建成运用后,通过对黄河干流骨干工程联合调度,在作物生长的关键季节实施水量集中下泄,缓解了下游两岸地区的旱情,保证了生活生产供水的安全,发挥了灌溉供水效益。同时小浪底建成以来黄河下游河段没有发生断流现象,入海水量增大,河口地区生态环境显著改善。1999年10月至2006年10月,除2003年发生秋汛外,黄河流域来水持续偏枯,2002~2003年度花园口站天然径流量仅250.67亿 m^3 ,仅为多年均值的

50%,是有实测资料以来最小值。由于小浪底水库的合理调蓄,不仅确保了黄河下游不断流,保障了黄河下游沿黄地区按照国家批准的年度用水计划用水,还四次向河北、天津应急调水,七次实施引黄济青,2006年首次实施引黄入淀。

1.1.2.4 已建骨干工程的发电作用

黄河干流峡谷众多,水力资源丰富。据2004年完成的全国水力资源复查结果,黄河流域水力资源理论蕴藏量共4 331.2万kW,其中干流3 282.7万kW,占75.8%,具有良好的水电开发条件。新中国成立后,黄河干流水电资源得到了高度开发。截至2007年底,黄河干流已建、在建水电站28座,装机容量达20 942万kW。已经建成的龙羊峡、尼那、李家峡、直岗卡拉、刘家峡、公伯峡、苏只、盐锅峡、青铜峡、八盘峡、小峡、大峡、沙坡头、三盛公、万家寨、天桥、三门峡、小浪底等18座水电站,装机容量1 226.54万kW。正在建设的水电站有拉西瓦、康扬、黄丰、积石峡、炳灵、龙口、西霞院等7座,装机容量498万kW。龙羊峡、李家峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡等上游10余座水电站组成了中国目前最大的梯级水电站群。据2005年统计,黄河干流水电站已累计发电约4 850亿kWh,直接发电效益达2 150多亿元,有力地促进了流域经济的发展。

1) 龙羊峡水电站发电效益

龙羊峡水电站是黄河上游的“龙头”电站,被誉为“万里黄河第一坝”,电站装有4台单机容量32万kW的水轮发电机组,总装机容量128万kW,年设计发电量60亿kWh,是西北电网第一调峰调频电厂。电站投产以后一直承担西北电网第一调峰调频任务,提高了西北电网的电能质量,保证了电网的安全稳定运行,增加了电网的可靠性,同时也提高了下游梯级水电站的保证出力。

2) 刘家峡水电站发电效益

刘家峡水电站装机容量122.5万kW,设计年平均发电量为57亿kWh。电站于1968年10月蓄水,1969年4月1日首台机组并网发电,1974年12月5台机组全部投入运行。刘家峡水电站是西北电网的骨干电站,在西北电力系统中处于十分重要的地位。

刘家峡水电站一直担负着西北电网的调峰、调频、调相的重要任务。近几年来西北电网的峰谷差冬季超过100万kW,而刘家峡水电厂就承担90万kW,即使汛期水电大发时,根据系统需要,还得担负约40万kW的峰谷差的调节任务。年调峰电量达33亿kWh,占多年平均实发电量的68.75%。

刘家峡水电站还担负着西北电网的事故备用任务,其备用容量达该电站总装机容量的20%,为减少系统事故损失起了十分重要的作用。

3) 三门峡水电站发电效益

三门峡水电站自1973年年底第一台机组发电投产,1978年底完成第五台机组安装,电站总装机容量为25万kW,经过以后的扩机改造,三门峡水力发电厂现有7台水轮发电机组,总装机容量41万kW,年发电量10亿kWh,是豫西地区承担调峰、调频任务的主要电站之一。从1973年12月第一台机组发电至2006年底,三门峡水电站已经累计发电331.61亿kWh。

三门峡水电站1989年以前一般只在非汛期发电,对河南省用电的高峰期即12月至翌年的第一季度很有补益,对缓解华中电网供电紧张状况也起到了较大的作用。从1989

年开始,三门峡水电站充分利用汛期的大洪水,对7、8月的来沙高峰期进行集中排沙,在8月下旬至汛末入库水沙较平稳时进行汛期发电,期间如遇大洪水,发电服从防洪、排沙运用。通过合理调度,平均每年可增加发电时间1 500 h,较好地处理了防洪、排沙减淤和汛期发电三者之间的关系。尤其是三门峡水电站担任电力系统中的部分峰荷容量,降低了系统中火电站的煤耗,取得了显著的经济效益。

4) 小浪底水电站发电效益

小浪底电站总装机容量180万kW,多年平均设计发电量51亿kWh,供电范围主要是河南省电网,是河南省电网装机规模最大、调峰能力最强的调峰电源。小浪底水库调节库容大,在满足防洪、防凌、减淤、供水和灌溉等综合利用要求的条件下,能够承担峰荷工作容量135.0万kW,避免电力系统135.0万kW的火电机组启停调峰,大量减少火电机组的启停费用。据2005年底统计,小浪底水电站6年来累计发电183.5亿kWh,实现销售收入44.6亿元,不仅创造了显著的经济效益,还有效缓解了电网用电紧张局面。

1.1.2.5 三门峡水库和小浪底水库的减淤作用

黄河是一条多泥沙河流,骨干工程在黄河减淤中也发挥着重要作用。三门峡水库自1960年9月至1964年10月,水库拦沙44.7亿t,使黄河下游河道冲刷22.3亿t。第一次改建后到1973年黄河下游河道又发生回淤。水库自1973年11月采用“蓄清排浑”控制运用以来,每年非汛期水库蓄水拦沙,下泄清水,使下游河道由建库前的淤积变为冲刷,把非汛期的泥沙调到汛期大流量时排泄,充分发挥黄河下游河道大水带大沙的特点,有利于下游河道输沙入海,减少河道淤积。

小浪底水库主要通过水库拦沙和调水调沙对下游河道发挥其减淤作用。小浪底水库拦沙约100亿t,可使下游河道减淤78亿t左右,约相当于下游河道20年的淤积量。根据下游河道断面法冲淤量计算结果,小浪底水库下闸蓄水运用以来(1999年10月至2008年4月),黄河下游各个河段都发生了冲刷,白鹤至利津河段冲刷15.90亿t。其中高村以上河段冲刷11.88亿t,占冲刷总量的72.6%;艾山以下河段冲刷2.73亿t,占冲刷总量的16.7%;高村至艾山河段冲刷1.76亿t,占下游河道冲刷总量的10.7%。从冲刷量的时间分布来看,冲刷量主要集中在汛期,汛期下游河道共冲刷11.18亿t,占年总冲刷量的68.2%。

伴随着下游河道的持续冲刷,各河段平滩流量不断增大,黄河下游河道的最小平滩流量由2002年的最小值1 800 m³/s增加到3 800 m³/s以上,各个断面平滩流量变化情况见表1-2。

表1-2 2002年后黄河下游河道平滩流量变化情况

(单位:m³/s)

项目	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	涑口	利津
2002年汛初	3 600	2 900	1 800	2 070	2 530	2 900	3 000
2003年汛初	3 800	2 900	2 420	2 080	2 710	3 100	3 150
2004年汛初	4 700	3 800	3 600	2 730	3 100	3 600	3 800
2005年汛初	5 200	4 000	4 000	3 080	3 500	3 800	4 000
2006年汛初	5 500	5 000	4 400	3 500	3 700	3 900	4 000
2007年汛初	5 800	5 400	4 700	3 650	3 800	4 000	4 000
2008年汛初	6 300	6 000	4 900	3 810	3 800	4 000	4 100
累积增加	2 700	3 100	3 100	1 740	1 270	1 100	1 100

1.2 研究的必要性

如前所述,黄河干流已建、在建水利水电工程 28 座,总库容 694.2 亿 m^3 ,总装机容量 20 942 万 kW。黄河支流已建成大、中、小型水库 2 600 多座,总库容 130 多亿 m^3 。上述水利工程的兴建,为开发利用黄河水资源提供了重要的基础设施,在抗御旱、涝、洪、碱等自然灾害,工农业及城乡生活供水,发电,调水调沙和改善生态环境等方面发挥了显著作用,产生了巨大的社会效益和经济效益。

然而,兴建水利水电工程通常会产生诸多的生态环境问题,水库的修建往往会造成上下游流域水文过程深刻而剧烈的变化,改变水流的自然循环,造成泥沙淤积和水温升高等问题,改变河道和冲积平原的生物和物理特征,减弱了河口的造陆过程,破坏全流域的水分配和水生态平衡,破坏河流以及地下水的连续性,从而严重地干扰和改变流域生态系统。对于水库周边陆生生物而言,淹没影响到了它们的生境,使其和两栖植物必须适应水位上涨而造成的淹没,栖息地的破坏可能导致陆生植物的迁移或灭亡;对于水库中的水生生物而言,河流生态系统转变为水库生态系统后常常会加剧种间竞争,产生缺氧的水体环境,破坏原有栖息地的稳定,非自然规律的水位涨落及其引发的温度变化会干扰生物节律;而对于下游水生生物而言,修坝首先对洄游性鱼类产生致命影响,其次由于洪水得到了控制,同时也就限制了水生环境与陆生环境之间沉积物、营养物和生物体的交换,使得下游河段的饵料条件变差;这一系列的影响可能使生态系统丧失生物多样性。以黄河上游为例,在黄河上游干流,已建、在建水库 8 座,水库建成改变了下游的水文条件,阻断了河流廊道,水生生物的种类、组成发生了变化,如宁夏河段的重要经济鱼类——北方铜鱼,在青铜峡大坝建成以后,阻断了它的产卵洄游道路,致使这种鱼类在这一河段的资源量日趋减少;长期的小流量过程造成了宁蒙河道萎缩,再加上十大孔兑不断地向宁蒙河道倾泄泥沙,又没有适量的洪水过程进行冲刷,日积月累造成宁蒙河道部分河段成为“地上悬河”。

近年来,水资源开发利用引起的河流生态环境问题已逐渐引起了人们的重视,人们意识到,要实现河流的可持续性开发,必须在开发的同时保护河流,维护河流健康已成为各大流域江河治理的新思路。

水库蓄水运行后,对于河流上下游的物理性质的负面影响可以划分为两类:第一类问题是栖息地特征变化,主要指库区淹没、泥沙淤积,水库下游冲刷引起河势变化,河湖连通关系的变化等,由此引起栖息地特征的变化,进而影响生境质量。第二类问题是水文、水力学因子影响,即流量、流速、水温、水质和水文情势等变化,由于水文、水力学因子变化,引起生态过程的变化。解决第一类问题主要靠河流生态修复工程。解决第二类问题的手段,目前可能选择的办法是改善现行的水库调度方法,在不影响水库的社会经济效益的前提下,尽可能满足水生生物对于水文、水力学因子的需求。另外,水库运行方式的改变对于改善河道形态和河湖的连通性也有一定的作用。

我国水利工程传统的调度方式主要是考虑社会经济开发(防洪、供水、发电、航运等),对大型水库建设和运行中存在的环境问题,虽然也有过大量的研究和探索,但是对水库建成运行引起的环境问题并没有足够的重视。我国已经建成了相当规模的水利工程

体系,在水利工程的运行中兼顾生态环境既现实可行又经济合理,对于水资源可持续利用具有十分重要的意义。但是,水利工程对生态系统的影响、水文过程与生态系统的响应关系以及水库生态调度的关键技术等科学问题还有待解决。

目前,黄河流域干流已建工程对生态系统的影响研究很欠缺,对黄河干流水库生态调度模式的研究是一个空白。针对当前黄河水资源管理与生态环境面临的严峻形势,为了减少黄河干流水库对生态系统的胁迫,维持黄河生态系统的健康,本研究以黄河干流水库为研究对象,分析水库对生态系统的影响,确定河流生态系统与水沙过程响应关系,明确水库调度生态目标,探讨水库生态调度模式,提出一个满足各方面需求的多目标生态调度方案,这对于建设生态友好型水库、维持黄河健康生命有很大的现实和科学意义。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 环境流量研究进展

河流水文过程对河流生态有重要作用,一方面生物生命过程对水文及环境要素有着特定的需求,同时水文过程也在不断塑造着河床形态,改变栖息地形态。在两者的共同作用下,河流水分、水力、泥沙、基质等基本条件随时空变化,水分过程对河流生态系统产生了复杂的生态效应,河流生态系统与水文过程之间存在密切的相应关系。在目前技术条件下,水库可控的因素主要集中在流量和流速上,而流速又主要取决于流量和下泄口的位置。可见流量是水库调节下游水文生态系统状态的直接有效变量。因此,寻找生态调度目标与流量过程之间的关系是实现水库生态调度目标的关键。

在全球范围内,为了满足水资源需求的不断增长,水库拦蓄、跨流域调水以及河流分水等水资源开发利用改变了河川径流的自然状况,引起河流生态系统的退化,加剧了水资源开发利用与河流生态系统保护之间的矛盾。为了实现水资源在不同用水户之间的合理配置,保护河流生态系统的健康,一个新的研究领域——评估河流自身对水资源的需求:环境流量研究被逐步发展起来。环境流量的研究可分为三个阶段:①20 世纪 60 年代之前为河道生态环境需水理论的萌芽阶段,主要针对满足河流的航运功能进行研究,缺乏成熟的理论和方法。②70 年代至 80 年代末期,此阶段河道生态环境需水及其相关概念得到人们普遍认同,开始从不同的角度对其进行系统研究,最初是根据水文历史资料进行河流流量分析,提出了一些基于水文学分析的方法,例如 Tennant(中科院,2000)。后来水力学家根据河道断面参数判断河流所需流量,形成了基于水力学分析的方法,例如科罗拉多州水利局(Colorado Water Conservation Board)专家提出的 R22Cross 法。以上两种方法都是从河流水文和水力学角度出发,缺乏与生物学的结合,这使得河道生态环境需水研究缺乏生态学依据,影响了方法的可信性,于是专家将水力分析与生境评价相结合,提出了基于生境适宜性评价和模拟的方法,例如 IFIM/ PHABSIM 法。③90 年代之后,随着河流连续系统等思想的提出,河道生态环境需水理论开始完善,原有的研究方法不断得到改进,同时又出现了一些新的研究方法,其中最为突出的是整体研究法(Holistic Approach),

特点是注重对河流生态系统整体的考虑。

1.3.1.1 环境流量研究方法

据 Thame 在 2003 年总结,全球有 44 个不同国家进行河流生态需水计算,所用估计方法超过 200 种之多。这些方法可以分为 4 类。

1) 水文学方法 (Hydrological Methodologies)

该方法是确定一个保护河流流量权所需的最小流量标准。这种方法也属于非现场类型的方法,以流量的历史资料而不是现场测量数据来推导河流流量推荐值。主要有 Tennant 法(或 Montana 法)、7Q10 法以及水文变换的生态限制法(ELOHA)等。

在 Tennant 法中,所推荐的最小流量基于平均年流量的百分数,冬季和夏季有不同的百分比。所推荐的级别则基于 Tennant 对于蒙大拿、怀俄明和内布拉斯加的 11 条河流的河道宽度、深度和流速以及流量变化情况的观察。Tennant 法最主要的限制之一是这个技术应用于其他河流时,要求被研究的河流在地貌上相似于当初研究的河流。所需的标准也不是 Tennant 给出的,使得技术难以直接转换。

美国的 7Q10 法已被多个国家采用,作为废水处理厂制定排污荷载的参考基准。美国环保局把 7Q10 定义为“最近十年里连续最枯七天的平均流量值,或者说,采用 90% 保证率下连续最枯七天的平均水量”。当制定点源排污可承受荷载量或总计最大日平均荷载方案时,要用到 7Q10 法。该法求出的统计流量值常作为河流水污染防治用水的最小设计值。7Q10 法的特点:比较简单,容易操作,劳动强度和工作量小,在我国许多大型水利工程建设的环境影响评价中得到应用。必须注意的是,虽然这个较低流量值约等于 10 年一遇的枯水年流量值,可近似用于限制污染物排放,但由于简化了河流的实际情况,没有直接考虑生物的需求和生物间的相互作用,某些情况下 7Q10 流量统计值并不符合河流水生生态系统正常运作的需水量。7Q10 法主要针对以排污功能为主体目标的河流,如果用于一般没有排污目标的河流,计算值往往大于一般河流系统实际的生态环境需水量,不符合水能资源最优化利用原则。

ELOHA 是基于流量-生态关系,具有科学性、可信性,且可以应用于多个河流(区域尺度的)环境流量标准的一般框架,包括数据的有效性、科学的接受能力,以及社会/制度之间的相互联系等。获得流量-生态响应曲线的过程包括 4 个步骤:①编辑一个地区的数据库,日流量或月流量的水位曲线图,用于描述整个地区的基线(未开发)和已经开发条件下的“控制点”(管理点或者生态数据的站点)之间的关系。水文模型被用于扩展河道流量数据以校核控制站点,以及在需要的时候为未控制点提供综合的数据。②根据步骤①中得到的基流数据,按照流量的相似性,对河流进行分段。一个区域的河流类型可以包括 10 种以上。③计算每个控制点水文变化,以每个控制点的已发展状态的流量偏离基流状态的百分数表示,采用 6~10 个密切联系于生态状况和能用于水管理目标的流量变量。④通过水文变化的百分数与相应的生态状况变化之间的联系,获得流量-生态响应曲线,通过一组流量和生态学变量,每种河流类型即得到一种曲线。但这种方法需要详细的生态水文数据,操作难度大。

2) 水力学方法 (Hydraulic Rating Methodologies)

该方法是根据河道水力参数(如宽度、深度、流速和湿周等)确定河流所需流量,所需

水力参数可以实测获得,也可以采用曼宁公式计算获得,代表方法有湿周法和 R2CROSS 法等。水力学法的优点是只需要进行简单的现场测量,不需要详细的物种—生境关系数据,数据容易获得。但是该方法体现不出季节变化因素,通常不能用于确定季节性河流的流量,但它能为其他方法提供水力学依据,所以可与其他方法相结合使用。

3) 栖息地法 (Habitat Simulation Methodologies)

该法需要对所研究的水文系列的特定水力条件及相关鱼类栖息地参数选择的认识与分析。栖息地法最典型的是 IFIM 法。该种方法的优点在于能将生物资料与河流流量研究相结合,使其更具有说服力。但是传统 IFIM 法分析的重点是目标物种而非整个河流生态系统,因此它的输出结果也非整个河流管理计划所要求的流量推荐值。同时由于定量化的生物信息较难获得,也大大限制了该方法的使用。

4) 整体法 (Holistic Methodologies)

这种方法克服了栖息地法针对一二种生物的缺点,强调河流是一个综合生态系统。它从生态系统整体出发,根据专家意见综合研究流量、泥沙运输、河床形状与河岸带群落之间的关系,使推荐的河道流量能够同时满足生物保护、栖息地维持、泥沙沉积、污染控制和景观维护等功能。因此,这种方法都需要组成包括生态学家、地理学家、水文学家、水文学家等在内的专家队伍。该方法具有典型代表性的有 BBM 法 (the Building Block Methodology)、基准法 (Benchmarking Methodology)、DRIFT 法 (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) 和专家组评价法 (Expert Panel Assessment Method)。

整体法基于天然水文机制,并试图提供整个生态系统包括河道、滨岸带、地下水、湿地和河口的需水。可以得到将流量与河流水力、地貌、水质或生态等方面相联系的直接数量化模型,甚至可以通过调查来建立这样的模型。整体法的特点是从一些关键的流量组成及其与生态过程之间的联系,建立了环境流量的机制,已知这些流量要素与生态过程有关。流量组成的量级可以通过应用水力模型得到,水力模型将水位、流速、深度和/或剪切力等相联系,同时,现场检验可以将这些变化与重要的生态要素或过程相联系。

1.3.1.2 黄河流域环境流量研究现状

黄河以其高泥沙含量闻名于世,黄河上与生态环境需水量有关的研究也始于对输沙水量的研究,“八五”科技攻关项目“黄河流域水资源合理分配和优化调度研究”,首次将河道来水来沙、河道冲淤与输沙水量联系起来,对黄河下游河道汛期和非汛期的输沙用水进行分析。

“九五”攻关专题“三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题研究”之子专题“黄河三门峡以下水环境保护研究”,全面分析了三门峡以下的河流水环境和水生态状况,并采用环境容量模型对河流污染稀释自净需水量作了分析计算;采用历史流量法 (Tennant 法) 对河道内水生态及河口地区的最小生态环境需水量进行了详细分析计算,最后在综合考虑污染稀释自净需水量和计算的河道最小需水量基础上,经整合给出黄河三门峡以下河道内生态环境需水量的最终结果。

“十五”国家科技攻关计划重大项目“中国分区域生态用水标准研究”之子专题“黄河流域生态用水及控制性指标研究”中,以钱宁教授关于“河流的平衡与稳定是两个不同的概念”之观点为依据,通过对黄河下游部分水文断面 1972 ~ 1979 年连续 8 年的水深—水