

【特稿】

多泥沙河流水库汛期水沙调控度研究

张金良^{1,2}, 胡春宏³, 刘继祥^{1,2}, 罗秋实^{1,2}, 鲁俊^{1,2}

(1.黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2.水利部 黄河流域水治理与
水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003; 3.中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 汛期是多沙河流水库调控水沙的关键时期, 以往研究和实践中, 多以定性或宽泛指标描述水沙调控。因此, 建立度量指标体系, 研究多沙河流水库汛期水沙调控度对科学认知水库调控能力、指导水库设计运用具有重要意义。根据黄河水沙调度实践, 分别定义多沙河流水库汛期径流调控度和泥沙调控度指标, 并给出相应的计算公式; 采用1986年以后汛期末来水来沙条件, 分析黄河中游干支流水库汛期水沙调控度大小, 发现现状已建水库调控度较小、调控能力不足, 规划和在建水库调控度较大; 进一步采用数学模型对比分析不同水库运用方式对汛期水沙调控度的影响, 结果表明“蓄清调浑”运用方式相比“蓄清排浑”运用方式, 不仅可以有效减小不同时期库区泥沙淤积量, 而且能够实现部分拦沙库容再生利用, 从而增大水库汛期水沙调控度。

关键词: 汛期水沙调控度; 蓄清调浑; 多沙河流水库; 黄河

中图分类号: TV145; TV697.1; TV882.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.11.001

引用格式: 张金良, 胡春宏, 刘继祥, 等. 多泥沙河流水库汛期水沙调控度研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 1-5.

Study on Regulation Degree of Water and Sediment of Reservoirs from Sediment-Laden Rivers in Flood Season

ZHANG Jinliang^{1,2}, HU Chunhong³, LIU Jixiang^{1,2}, LUO Qiuishi^{1,2}, LU Jun^{1,2}

(1.Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2.Key Laboratory of Water Management and

Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (Preparation), Zhengzhou 450003, China;

3.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Flood season is a critical period for reservoirs on sediment-laden rivers to regulate water and sediment. In previous studies and practice, qualitative indicators are widely used to describe regulation degree of water and sediment. Thus, establishing an accurate or relatively accurate measurement index system and studying regulation degree of water and sediment of reservoirs on sediment-laden rivers in flood season is of great significance for understanding regulation capability of reservoirs and guiding design and operation of reservoirs. According to the practice of water-sediment regulation in the Yellow River, the runoff regulation degree and sediment regulation degree were defined respectively, also the corresponding calculation expressions were given; the incoming conditions of water and sediment were used to analyze the regulation degree of water and sediment of reservoirs on the middle reaches of the Yellow River. It was found that the existing projects had a smaller regulation degree and insufficient regulation ability, while the regulating projects to be built or under construction had a larger regulation degree; the mathematical model was further used to compare and analyze the influence of different reservoir operation modes on the change of regulation degree of water and sediment in flood season. The results show that comparing with “storing clean water and discharging the muddy”, “storing clean water and regulating the muddy” can not only effectively reduce the amount of sedimentation in the reservoir in different periods, but also realize the regeneration of part of the reservoir capacity, thereby improving the regulation degree of water and sediment of reservoir in flood season.

Key words: regulation degree of water and sediment in flood season; storing clean water and regulating muddy flow; reservoirs from sediment-laden rivers; Yellow River

1 引 言

多沙河流来水来沙主要集中于汛期^[1], 汛期是水沙调控的关键时期^[2], 一般会利用水库汛限水位以下库容通过合理的水位和下泄流量控制对入库水沙进行调节。汛期调控能力大小不仅与入库水沙条件和调节库容大小相关, 同时受水库运用方式的影响。如何度量多沙河流水库对水沙的调控能力, 合理界定度量水

库汛期水沙调控能力的科学指标, 对指导黄河水沙调控体系的构建和科学运用具有十分重要的意义。

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402503); 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-65)

作者简介: 张金良(1963—), 男, 河南新安人, 正高级工程师, 博士, 主要从事黄河流域重大水工程与水沙调控研究工作

通信作者: 鲁俊(1981—), 男, 四川资阳人, 高级工程师, 主要从事水沙研究与规划设计工作

E-mail: 393956425@qq.com

自 20 世纪 50 年代至今,我国多沙河流水库设计运用技术不断发展进步,先后经历了“蓄水拦沙”“蓄清排浑”两个阶段,近期又发展到“蓄清调浑”新阶段^[3]。不同阶段水库水沙调控的理念和作用大小不同。以往研究中,对多沙河流水库的水沙调控研究多集中在水库调度方式^[4]、调度指标^[5]、调度模型^[6]和调度效果^[7]等方面,例如:钱宁等^[8]指出在多沙河流的治理上,应充分发挥人的主观能动性,利用上游水库合理调节水沙过程,通过人造洪峰、加大洪峰泄量等措施冲刷下游河道;练继建等^[9]通过梯级水库联合调度模型对人工塑造异重流调度过程进行了模拟和优化;姚文艺等^[10]根据河流动力学原理,分析了水库运用对径流泥沙过程的调节作用及其对下游河道边界条件的影响;胡春宏^[11]系统分析了“蓄清排浑”运用方式对水沙调控的作用,提出了黄河小浪底等多沙河流水库运行方式的优化建议;张金良等^[3]研究了多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术,指出了“调浑”在水库调度运用中的重要性。在以往诸多研究中,缺少对多沙河流水库汛期水沙调控能力的研究,目前尚无合理度量多沙河流水库汛期水沙调控能力的科学指标,难以定量计算水库在不同时期的水沙调控度以及衡量水库不同运用方式下的水沙调控能力。

表 1 黄河干流主要控制站水沙特征值统计(1919—2018 年)

河段	水文站	水量/亿 m ³			输沙量/亿 t			含沙量/(kg·m ⁻³)		
		7—10 月	11 月至次年 6 月	合计	7—10 月	11 月至次年 6 月	合计	7—10 月	11 月至次年 6 月	平均
上游	头道拐	125.7	99.9	225.6	0.86	0.24	1.10	6.88	2.40	4.90
中游	龙门	154.5	125.2	279.7	6.67	0.95	7.62	43.14	7.58	27.24
	潼关	205.4	157.4	362.8	9.38	1.92	11.30	45.68	12.20	31.15
下游	花园口	226.0	177.0	403.0	8.56	1.65	10.21	37.86	9.34	25.33

黄河水少、沙多,水沙关系不协调,下游河道淤积成为“地上悬河”^[12],宁蒙河段淤积形成“新悬河”^[13]。多年的治黄实践经验证明,通过水库调控水沙对于协调水沙关系具有非常重要的作用^[14-15]。新中国成立以来,水库工程建设得到不断加强。三门峡水库是黄河中游干流上修建的第一座以防洪为主,兼顾防凌、灌溉、发电、供水等综合利用的大型水利枢纽工程,是黄河流域控制性骨干水库之一。之后,先后建设了刘家峡、龙羊峡、小浪底等多个大型骨干水利枢纽以及大量发电梯级水库。目前,黄河干流龙羊峡以下已经建成梯级水库 30 座,其中黄河干流中游有 6 座已建水库,自上而下分别为万家寨、龙口、天桥、三门峡、小浪底、西霞院水库(见图 1)。除此之外,黄河支流也建设了大量水库。

多沙河流水库设计运用技术不断发展,目前已经由“蓄清排浑”发展到“蓄清调浑”新阶段。“蓄清排浑”时期,水库非汛期蓄水兴利,汛期降低水位排沙,

笔者根据多年研究和黄河水沙调度实践,剖析多沙河流水库汛期水沙调控度的具体含义,给出水库汛期水沙调控度的计算公式;以黄河中游水库为研究对象,度量了黄河中游已(在)建和规划水库汛期水沙调控能力,并采用数学模型计算,对比分析了典型水库在“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下的水沙调控度,以期多沙河流水库设计运用和黄河水沙调控体系构建提供参考。

2 研究对象及方法

2.1 研究对象概况

黄河是我国第二大河,发源于青藏高原巴颜喀拉山脉北麓约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东 9 个省(区),在山东省东营市垦利区注入渤海。干流河道全长 5 464 km,流域面积 79.5 万 km²。黄河流经多个不同的自然地理单元,地形、地貌和气候等区域差别很大。径流主要来自于上游河口镇以上,占全河的 62%;泥沙主要来自于中游河口镇至潼关区间,约占全河的 90%。中游潼关水文站 1919—2018 年多年平均径流量为 362.8 亿 m³、输沙量为 11.30 亿 t(见表 1),平均含沙量为 31.15 kg/m³,输沙量主要集中于汛期(占全年输沙量的 80%以上)。



图 1 黄河流域及干支流水库示意

虽然能够在一定程度上实现水库有效库容的保持,但在水库进入正常运用期后汛期仍然存在泥沙调控库容过小等问题,如目前的三门峡水库。“蓄清调浑”是对“蓄清排浑”的进一步创新发展,是指根据水库开发任务要求,充分考虑多沙河流来水来沙过程中场次洪水和年际间丰、平、枯变化,统筹调节泥沙对水库淤积形态和有效库容的影响,以协调水沙关系、长期保持有效库容、充分发挥水库综合利用效益为目的,设置合适的

拦沙和调水调沙库容,通过“拦、调、排”全方位协同调控,实现有效库容长期保持和部分拦沙库容的再生利用、拦沙库容与调水调沙库容一体化使用,即实现部分“水库容”和“沙库容”在一定时段内互换,充分发挥水库对泥沙的调节作用,一定时期或遇有利水沙条件可实现年度径流调节,并通过水库群调度和天然洪水泥沙过程衔接,更好地协调进入下游的水沙关系,以充分发挥水库综合利用效益^[3]。现阶段“蓄清调浑”运用及其设计技术已经在黄河上已建的小浪底水库和在建的东庄、规划的古贤等水库中应用。

2.2 汛期水沙调控度定义与表达式

对于多沙河流水库一般要设置一定的拦沙库容和调水调沙库容,水库运用分拦沙阶段和正常运用阶段。拦沙阶段,水库有一定的淤积量,但设计拦沙库容尚未淤满,汛期可以利用汛限水位以下扣除淤积体后的库容进行水沙调控。正常运用阶段,即设计拦沙库容淤满,汛期只能利用设计汛限水位到死水位之间的库容以及再生利用的拦沙库容进行水沙调控(见图 2)。随着入库水沙条件变化和水库淤积边界条件变化,水库汛期水沙调控能力大小也在不断变化。

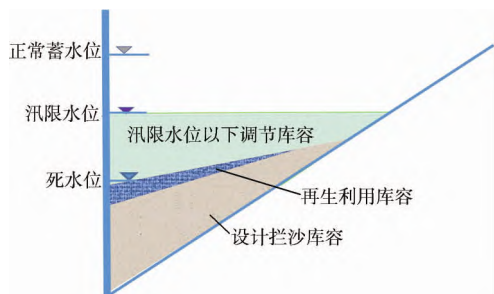


图 2 水库调节库容示意

根据黄河水沙调度实践,水沙调控度是对入库水

沙过程调控能力大小的度量,当单纯度量以水为主的调控能力时称之为径流调控度,当单纯度量以沙为主的调控能力时称之为泥沙调控度。对多沙河流水库汛期径流调控度和泥沙调控度分别定义,径流调控度是指汛限水位以下的平均蓄水量除以汛期多年平均入库径流量,泥沙调控度是指汛限水位以下的调控库容与再生利用库容之和除以汛期多年平均入库泥沙量,计算公式分别为

$$R_{fw} = \frac{V_{fw}}{W_f} \quad (1)$$

$$R_{fs} = \frac{V_r + V_h}{W_{fs}} \quad (2)$$

式中: R_{fw} 为水库汛期径流调控度; R_{fs} 为水库汛期泥沙调控度; W_f 为汛期多年平均入库径流量; W_{fs} 为汛期多年平均入库泥沙量(体积); V_{fw} 为水库汛期汛限水位以下的平均蓄水量; V_r 为水库汛限水位以下调控库容; V_h 为再生利用库容,根据水库设计水沙条件,按照设计功能和运用方式分析确定,“蓄清调浑”水库再生利用库容一般为拦沙库容的 20% 左右。

由式(1)、式(2)可以看出,水库拦沙期随着库区泥沙淤积,汛期水沙调控度不断减小,直至库容淤积达到设计拦沙库容后趋于稳定。汛期水沙调控度越大,表示汛期水库水沙调控的能力越大。

3 黄河中游水库汛期水沙调控度

选定黄河中游万家寨、龙口、天桥、东庄、三门峡、小浪底、西霞院等已(在)建水库和古贤、碛口等规划水库,根据其进入正常运用期后的调节库容大小,采用 1986—2018 年的坝址处汛期来水来沙量,分别计算各水库汛期水沙调控度,结果见表 2。

表 2 黄河中游主要水库汛期水沙调控度计算结果

水库名称	控制水文站	汛限水位/m	死水位/m	汛期调节库容/亿 m ³	再生库容/亿 m ³	汛期水量/亿 m ³	汛期沙量/亿 m ³	径流调控度	泥沙调控度
万家寨	头道拐	966		1.87	0.00	68.95	0.26	0.03	9.35
龙口	河曲	893	888	0.45	0.00	66.77	0.40	0.01	1.44
天桥	府谷	834	828	0.28	0.00	70.43	0.44	0.00	0.83
碛口(规划)	吴堡	775	745	14.20	22.16	76.17	1.28	0.48	36.96
古贤(规划)	龙门	617	588	20.00	18.68	84.74	2.53	0.46	19.91
东庄(在建)	张家山	780	756	3.27	4.11	5.92	1.27	1.25	7.54
三门峡	潼关	305	290	0.55	0.00	115.69	3.61	0.005	0.20
小浪底	三门峡	254	230	10.50	0.00	112.08	4.70	0.09	2.91
西霞院	小浪底	131	125	0.59	0.00	97.65	3.42	0.01	0.22

1986 年以后的来水条件下,黄河中游现状已建水库径流调控度较小,主要原因是已建水库中除小浪底外汛期调节库容较小,很难对汛期水沙过程进行大幅调节,这也是当前小浪底调水调沙后续动力不足的主要原因之一^[7]。东庄水库作为黄河支流泾河上在建

的水库,其汛期多年平均来水量相对较小,径流调控度较大;干流上规划的古贤和碛口水库,其设计的汛期调节库容较大,也具有较大的径流调控度。

1986 年以后的来沙条件下,黄河中游现状已建的水库中,万家寨和小浪底水库泥沙调控度相对较大,而

其余已建水库泥沙调控度相对较小。为了对黄河中游汛期泥沙有较好的调节,需要多个水库联合调度。万家寨水库虽然泥沙调控度较大,但其坝址处的来沙量相对较小,因此调沙作用十分有限。现状工程条件下,黄河调水调沙主要依靠小浪底水库。规划的古贤和碛口水库有较大的汛期调节库容和泥沙调控度。在建的泾河东庄水库规划设计时采用了“蓄清调浑”技术,除了具有一定的汛期调节库容外,还具有部分拦沙库容再生利用能力^[3],能够用于泥沙调节,因此也具有较大的泥沙调控度。

综合分析,黄河中游现状已建水库水沙调控度相对较小,调控能力不足,当前黄河调水调沙主要依靠小浪底水库,但小浪底水库调水调沙后续动力不足,且进入正常运用期后水沙调控能力较为有限。规划和在建的水库均具备较大的水沙调控能力,投入使用后可显著提升黄河中游水库群的水沙调控能力。古贤水库地处晋陕峡谷下段,控制黄河 60% 的泥沙和 80% 的粗泥沙,1986 年以后来水来沙条件下,该水库的汛期径流调控度为 0.46、泥沙调控度为 19.91,分别为小浪底水库的 5.1 倍和 6.8 倍,说明古贤水库无论其地理位置还是泥沙调控能力都具有无可比拟的优越性、不可替代性,是黄河水沙调控体系的核心工程。

4 不同运用方式对水沙调控度的影响

水库调节库容和汛期来水来沙量是影响汛期水沙调控度大小的直接因素,不同的水库运用方式也会影响水库泥沙冲淤和调节库容变化,进而影响水沙调控能力。结合河流数值模拟系统(RSS)一维水沙数学模型^[14],分析水库“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下水沙调控度年际变化情况,进一步研究水库运用方式对水沙调控度的影响。分别以东庄水库和小浪底水库为例进行分析,其中:东庄水库计算期从水库建成并投入运用开始;小浪底水库目前处于拦沙后期第一阶段,计算期从 2017 年开始。根据计算结果,绘制水库淤积量和汛期水沙调控度历年变化过程线,见图 3~图 6。

从图 3~图 6 可以看出,东庄水库和小浪底水库汛期径流调控度和泥沙调控度变化趋势基本一致,都是前期逐渐减小,后期逐渐趋于稳定。产生这种现象的原因是多沙河流域水库在运用中分为拦沙期和正常运用期,拦沙期水库持续拦减入库泥沙,库区泥沙淤积量逐渐增大,调节库容和水沙调控度逐渐减小;进入正常运用期水库基本保持冲淤平衡,调节库容和水沙调控度变化不大。“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下库区泥沙淤积量和汛期水沙调控度计算结果差异主

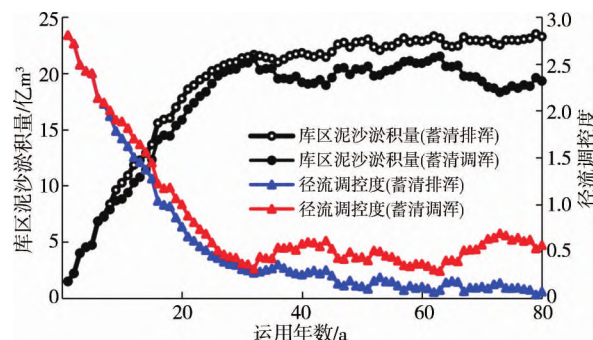


图 3 东庄水库淤积量和汛期径流调控度历年变化

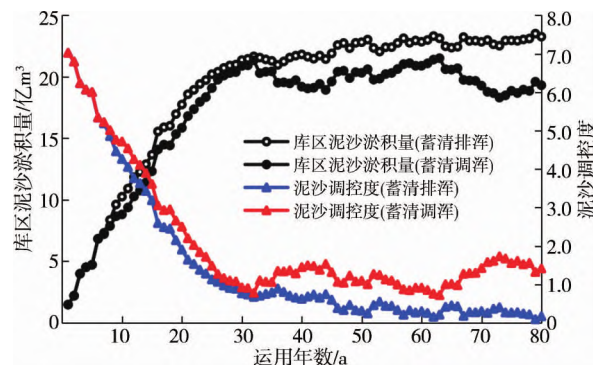


图 4 东庄水库淤积量和汛期泥沙调控度历年变化过程

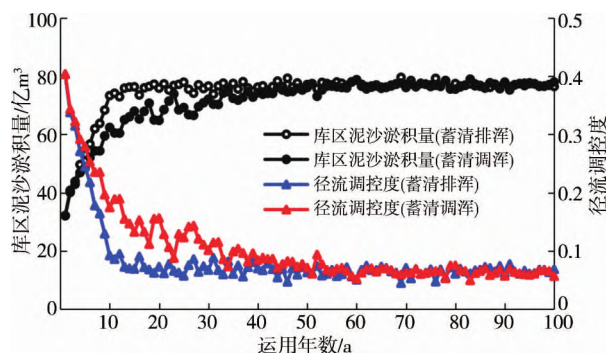


图 5 小浪底水库淤积量和汛期径流调控度历年变化过程

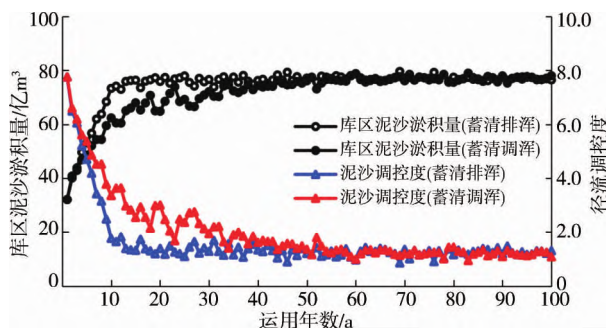


图 6 小浪底水库淤积量和汛期泥沙调控度历年变化过程

要体现在两个方面:一是拦沙期“蓄清调浑”运用方式下库区泥沙淤积量更小,且汛期水沙调控度更大,如计算期第 11 年小浪底水库“蓄清排浑”运用方式下泥沙淤积量为 74.13 亿 m^3 ,径流调控度和泥沙调控度分别为 0.1 和 1.7,而“蓄清调浑”运用方式下泥沙淤积量为 60.50 亿 m^3 ,径流调控度和泥沙调控度分别为 0.2 和 3.6,调控度大小提高 1 倍左右,产生差异的原因是“蓄

清排浑”运用方式仅考虑汛期水库降低运用水位排沙,而“蓄清调浑”运用方式则充分考虑来水来沙过程中场次洪水的水沙搭配关系,通过拦、调、排协同调控,能够在长时间尺度内合理调节排沙,减小水库淤积量;二是正常运用期东庄水库在“蓄清调浑”运用方式下年际间库区泥沙淤积量变化和汛期水沙调控度更大,原因是“蓄清调浑”运用方式利用双泥沙侵蚀基准面技术^[3],考虑了非常规排沙调度,遇有利的丰水年份,可以有效恢复部分拦沙库容再生利用,从而增大汛期水沙调控度,如计算期第66年东庄水库在“蓄清排浑”运用方式下泥沙淤积量为22.44亿m³,径流调控度和泥沙调控度分别为0.2和0.4,“蓄清调浑”运用方式下泥沙淤积量为20.69亿m³,径流调控度和泥沙调控度分别为0.4和1.0;第67年“蓄清排浑”运用方式下泥沙淤积量增大到23.23亿m³,径流调控度和泥沙调控度分别减小为0.1和0.2,而“蓄清调浑”运用方式下泥沙淤积量减小到19.75亿m³,径流调控度和泥沙调控度分别增大到0.5和1.3。上述水库汛期水沙调控度对比分析说明“蓄清调浑”运用方式比“蓄清排浑”运用方式的汛期水沙调控度更大,能有效提高多沙河流水库水沙调控效果。

5 结 论

(1) 为表征多沙河流水库汛期水沙调控能力,建立了汛期水沙调控度定义,并给出了计算公式。以黄河中游水库为研究对象,基于汛期水沙调控度研究了水库汛期水沙调控能力,指出黄河中游现状水库汛期水沙调控能力不足,在建和规划的水库具备较大的水沙调控能力。

(2) 根据多沙河流水库汛期水沙调控度定义,结合水沙数学模型,计算分析了东庄水库、小浪底水库在“蓄清排浑”和“蓄清调浑”两种运用方式下的水沙调控度历年变化情况,结果表明“蓄清调浑”相较“蓄清排浑”设计技术和运用方式,水库汛期的径流调节能力更大,并可有效减小不同时期库区泥沙淤积量,增大水库汛期水沙调控度。

(3) 古贤水库地处晋陕峡谷下段,控制黄河60%的泥沙和80%的粗泥沙,1986年以后来水来沙条件

下,其汛期径流调控度为0.46、泥沙调控度为19.91,分别为小浪底水库的5.1倍和6.8倍,说明古贤水库无论地理位置还是泥沙调控能力都具有无可比拟的优越性、不可替代性,是黄河水沙调控体系的核心工程。

参考文献:

- [1] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
- [2] 张金良.黄河调水调沙实践[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2008,41(9):1046-1051.
- [3] 张金良,胡春宏,刘继祥.多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术[J/OL].水利学报:1-10.(2021-06-09)[2021-08-28].https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210122.
- [4] 李国英.黄河调水调沙[J].中国水利,2002(11):34-38,10.
- [5] 韩其为.小浪底水库初期运用及黄河调水调沙研究[J].泥沙研究,2008,33(3):1-18.
- [6] 罗秋实.基于非结构网格的二维及三维水沙运用数值模拟技术研究[D].武汉:武汉大学,2009:123-124.
- [7] 陈翠霞,安催花,罗秋实,等.黄河水沙调控现状与效果[J].泥沙研究,2019,44(2):69-74.
- [8] 钱宁,张仁,赵业安,等.从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J].地理学报,1978,33(1):13-24.
- [9] 练继建,万毅,张金良.异重流过程的梯级水库优化调度研究[J].水力发电学报,2008,27(1):18-23.
- [10] 姚文艺,侯素珍,丁赞.龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13.
- [11] 胡春宏.我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践[J].水利学报,2016,47(3):283-291.
- [12] 安催花,鲁俊,吴默溪,等.黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究[J].水利学报,2020,51(4):402-409.
- [13] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46.
- [14] 张金良,练继建,张远生,等.黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J].水利学报,2020,51(8):897-905.
- [15] 张金良,鲁俊,韦诗涛,等.小浪底水库调水调沙后续动力不足原因与对策[J].人民黄河,2021,43(1):1-5.

【责任编辑 张华兴】