

王克志,刘晓民,刘廷玺,等.海勃湾水库排沙效果及影响因素[J].中国沙漠,2023,43(5):9-17.

海勃湾水库排沙效果及影响因素

王克志¹, 刘晓民^{1,2,3}, 刘廷玺^{1,2}, 杨耀天^{2,3,4}, 罗强⁵

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.黄河流域内蒙古水资源与水环境综合治理协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3.内蒙古黄河生态研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4.内蒙古金华源环境资源工程咨询有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 5.黄河海勃湾水利枢纽事业发展中心, 内蒙古 乌海 016000)

摘要: 海勃湾水库是黄河内蒙古段龙头水库,其排沙效果对水库运行及黄河内蒙古段泥沙淤积有着重要影响。水库排沙比是描述水库输沙特性的关键指标,排沙比越大,入库泥沙占水库淤积比例就越小。以海勃湾水库建成蓄水(2014年)至2021年实测资料为基础,分析水库排沙特征,并采用相关性分析探讨影响排沙比变化主要因素。结果表明:水库多年平均排沙比为19.35%,较设计值明显偏小,未产生理想排沙效果,淤积和排沙主要发生在汛期,大流量期间呈现“多来多排”的特点;排沙比变化主要受水沙条件和水库运行方式以及地形影响:排沙比与入库流量及入出库水沙协调性具有正相关关系,与坝前水位及滞洪时间具有负相关关系,水库地形上窄下宽、上陡下缓分布以及乌兰布和沙漠风沙入库对排沙比造成负面影响;汛期排沙比主要受滞洪时间影响。还建立了汛期排沙比经验计算式。

关键词: 排沙比; 入库流量; 滞洪时间; 海勃湾水库

文章编号: 1000-694X(2023)05-009-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00014

中图分类号: TV697.2

文献标志码: A

0 引言

海勃湾水库是黄河内蒙古干流河段唯一一座综合利用平原型水库(图1),多年平均入库含沙量 $3.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,水库蓄水后将不可避免地引起水库泥沙淤积问题,投入运行以来已累计损失库容43.5%,泥沙淤积问题显著,给防凌、防洪、生态带来一系列影响。水库排沙是减缓水库淤积、保持水库长期有效库容的重要措施^[1]。排沙比是反映水库拦截泥沙程度的重要依据,排沙比越大,水库淤积强度就越小,反之亦然^[2]。因此,探究海勃湾水库排沙比变化对于更详细地掌握水库蓄水拦沙情况,充分发挥水库综合效益具有重要意义。

Brune^[3]最早提出水库拦沙率曲线,后出现更简明的排沙比曲线^[4]。随着水沙观测资料的积累,基于实测资料分析不同河道及水库排沙比成果较多。张红武等^[5]通过泾河东庄水库不同组次动床模型排

沙试验,分析了排沙比与入出库水沙及库水位的变化规律;侯素珍等^[6]探讨了三门峡水库“蓄清排浑”运用以来水库敞泄及不同坝前水位对排沙效果的影响;金中武等^[7]阐述了三峡水库运用后水库排沙规律;为了探究影响三峡水库排沙比变化主要因素,陈桂亚等^[8]和董占地等^[9]分析了入库水沙、坝前水位以及泥沙粒径与排沙比之间的相关关系;通过对比分析溪洛渡水库和三峡水库排沙规律异同点,朱玲玲等^[10]剖析了溪洛渡水库排沙比偏小的主要原因。然而以实测资料计算的排沙比未考虑区间来沙引沙量,通常与实际排沙比产生较大偏差。傅旭东等^[11]在还原黄河下游河道引水引沙量的基础上,建立了场次洪水排沙比公式;刘尚武等^[12]更为全面地将三峡水库区间来沙量考虑在计算中,发现汛期排沙比主要受 V/Q 影响。这些研究成果一定程度上为河道及水库的排沙运用方式提供参考依据,

收稿日期:2022-12-28; 改回日期:2023-01-25

资助项目:国家自然科学基金项目(51969021,52169016);内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009-4);内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS05042)

作者简介:王克志(1997—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事水沙调控及河床演变方面研究。E-mail: 936075296@qq.com

通信作者:刘晓民(E-mail: 13204717007@163.com)

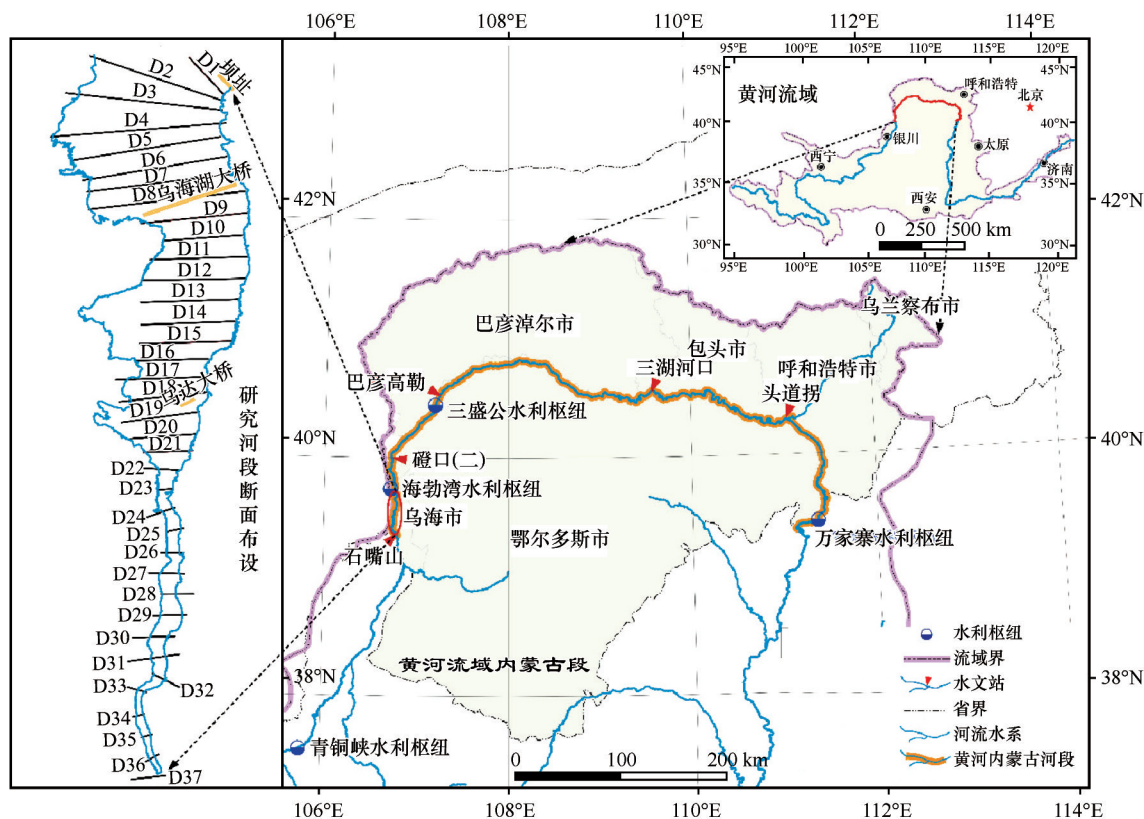


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

但是大多排沙比研究集中在峡谷型水库,而针对平原型水库尚不多见,尤其是对于海勃湾水库此类高含沙量平原型水库排沙比变化特征研究鲜有报道,同时对其排沙比影响因素不甚明确。

鉴于此,本文基于2014—2021年海勃湾水库上下游水文站水沙实测资料及库区断面地形测量数据,系统分析水库排沙比年际、年内变化规律,同时从水沙条件、水库运行方式及水库地形条件等着手,阐述影响排沙比变化的主要原因。研究成果对海勃湾水库水沙调度具有重要支撑作用。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

海勃湾水库位于黄河上游河段内蒙古自治区乌海市境内,控制流域面积31.34万 km^2 ,水库以防凌、发电为主,兼顾供水、减淤等综合效益^[13]。水库于2013年8月下闸蓄水,2014年4月蓄至1 073.0 m,最高蓄水位(正常蓄水位)1 076.0 m,总库容4.87亿 m^3 ,死库容为0.44亿 m^3 ,回水末端距坝址处33~36 km。水库按形态可分为两段,上段从回水末端

至乌达大桥为峡谷型河道,纵比降约0.83‰,河床稳定,断面窄深,河宽400~500 m;下段从乌达大桥至水库坝址,长约18 km,为游荡型河道,纵比降约0.16‰,断面宽浅,平均河宽2 000~4 000 m。库区两岸无支流汇入,左岸有坝址以上18 km的乌兰布和沙漠边界,年均风沙入库量为200万 $\text{t}^{[14]}$ 。水库11月至次年2月为冰凌期,3—6月为蓄水发电期,7—10月为汛期。入库水文站为石嘴山站,位于库区以上约50 km,出库水文站为磴口(二)站,位于库区以下约33 km,区间均无支流汇入。

1.2 数据来源

研究采用石嘴山站和磴口(二)站2014—2021年水沙日均实测数据,来源于中华人民共和国水文年鉴(第4卷)。同时收集到2014年3月、2016年7月、2019年11月、2020年11月、2021年11月水库37个固定测量断面实测地形资料,断面布置位置见图1,断面数据包括岸上和水下两部分,岸上部分起点距及高程采用动态CORS-RTK技术测定,水下部分的浅水区、深水区分别用测深杆与单波束测深仪测量(仪器测量精度为0.01 m,测量误差不大于

$14\sqrt{D}$, D 为测站点至观测点间水平距离);此外还包括水库2014—2021年坝前水位日均资料,均来源于黄河海勃湾水利枢纽事业发展中心。

2 海勃湾水库排沙比变化特点

2.1 年际变化

将乌兰布和沙漠来沙与石嘴山站来沙之和作为海勃湾水库入库沙量,得到2014—2021年入出库水沙及排沙比年际变化如图2A所示。

水库年均排沙比为19.35%,坝前水位和排沙比基本呈相反变化趋势,2017年以前,由于跨越库区道路淹没限制,水库最高蓄水位未超过1 073.5 m,2014—2016年排沙比均值为17.79%;2017年跨越库区道路拆除重建,水库逐渐蓄至1 075 m,2017—2021年(除2020年)排沙比均值为15.15%,大水深环境致使水库水动力减弱,泥沙淤积在库中概率增大。

水库年均入库沙量为0.6亿t,小于设计入库沙

量0.919亿t,年均排沙量仅0.121亿t。其中2020年水库出库沙量最多且排沙比最大是因为采用绞吸式挖泥船和船载式水利设施进行了人工清淤,同时恰遇该年水量偏丰,开展了水力排沙调度等措施,累计排沙量约1 779万 m^3 ,增大了全年排沙比。

水库年均淤积泥沙0.479亿t,其中2018年淤积量最大,高达1.198亿t,是年均淤积量的2.5倍,排沙比仅为14.05%,对水库泥沙淤积总量产生了很大影响。

2.2 年内变化

海勃湾水库2014—2021年月均入出库水沙量及排沙比变化如图2B所示。水库年内排沙比分配不均匀,各月变化差异较大,具体表现为1—2月排沙比最大,8—10月排沙比为年内最小,导致这种现象的原因与坝前运行水位密切相关:1—2月坝前水位相对较低,且入库沙量较小,而8—10月坝前水位逐步上升,且入库沙量增多,水库难以排出大量泥沙。

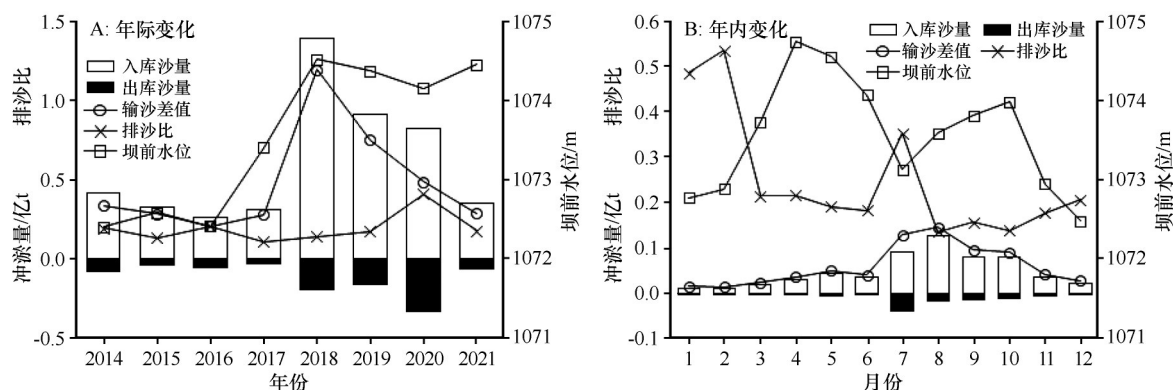


图2 海勃湾水库年际年内入出库水沙量及排沙比变化

Fig.2 Interannual variation of water and sediment ratio in and out of Haibowan Reservoir

从入出库沙量来看,汛期7—10月入库、出库沙量都比较大,其中汛期排沙量占年排沙量60.39%;从输沙量差值来看,汛期淤积量为全年最高,占年淤积量63.1%;说明汛期既是海勃湾水库集中排沙时段又是重点淤积时段,这也符合河道型水库的冲淤特点。

3 水库排沙比影响因素

3.1 入出库水沙条件的影响

3.1.1 汛期水沙条件

海勃湾水库2014—2021年汛期入库流量、出库流量、入库输沙率及坝前最低水位等特征值列于

表1。综合来看,入出库水沙量大小及其输送过程对排沙比均有着不同程度影响。

具体来看,海勃湾水库汛期入库流量与水库排沙比呈正相关关系,入库流量越大,水库排沙比越大。除2020年汛期开展了低水位排沙导致排沙比偏大外,其余年份汛期入库流量与水库排沙比相关系数 R^2 达到了0.62,相关性较好;汛期坝前最低水位则与水库排沙比呈负相关关系($R^2=0.61$),说明汛期坝前水位越低对水库排沙越有利。

入出库水沙峰协调性越好,水库排沙比越大。当洪峰和沙峰同步出现或沙峰略微滞后于洪峰时,即大水挟带大沙输送至坝前,可以通过较大的下泄过程排出水库时,水库排沙比较大^[10]。如2016年汛

表 1 海勃湾水库汛期入出库流量、输沙率、坝前水位及排沙比变化

Table 1 Changes of inflow and outflow discharge, sediment transport rate, water level in front of dam and sediment discharge ratio in Haibowan Reservoir during flood season

| 年份 | 入库流量/(m ³ ·s ⁻¹) | | | 出库流量/(m ³ ·s ⁻¹) | | | 入库输沙率/(t·s ⁻¹) | | | 坝前最低水位/m | 水库排沙比/% |
|------|---|-------|-------|---|-------|-------|----------------------------|--------|-------|----------|---------|
| | 均值 | 最大值 | 出现时间 | 均值 | 最大值 | 出现时间 | 均值 | 最大值 | 出现时间 | | |
| 2014 | 1 084 | 1 640 | 10-15 | 1 040 | 1 760 | 10-20 | 2.206 | 6.940 | 08-20 | 1 070.00 | 13.94 |
| 2015 | 792 | 1 610 | 10-14 | 741 | 1 430 | 10-15 | 1.522 | 10.305 | 08-15 | 1 070.00 | 9.14 |
| 2016 | 695 | 1 480 | 10-19 | 691 | 1 140 | 10-28 | 1.454 | 11.100 | 10-20 | 1 070.00 | 9.84 |
| 2017 | 810 | 1 440 | 10-26 | 777 | 1 380 | 10-26 | 1.581 | 4.680 | 08-24 | 1 070.52 | 8.03 |
| 2018 | 2 284 | 3 480 | 10-07 | 2 204 | 3 470 | 10-10 | 10.812 | 87.800 | 07-28 | 1 071.50 | 15.13 |
| 2019 | 2 094 | 3 060 | 07-20 | 1 946 | 2 980 | 07-21 | 4.828 | 9.820 | 08-02 | 1 069.08 | 20.74 |
| 2020 | 2 294 | 3 330 | 08-25 | 2 214 | 3 290 | 08-25 | 4.617 | 20.787 | 08-11 | 1 067.68 | 62.16 |
| 2021 | 1 044 | 2 200 | 10-23 | 1 346 | 2 100 | 10-24 | 1.123 | 7.589 | 10-24 | 1 073.18 | 15.04 |

期坝前水位在 1 071.5~1 073.9 m,虽然入库流量较小,均值仅 695 m³·s⁻¹,但入出库流量同步,且沙峰略滞后于洪峰(图 3A),导致其排沙比大于流量相对较大的 2015、2017 年;又如 2021 年与 2016 年入出库水沙峰类似,与 2018 年相比,汛期坝前水位均值接近、流量约占其 1/2,但排沙比却十分接近。除此之外,

其余各年沙峰均早于洪峰。以 2018 年汛期为例,如图 3B 所示,汛期坝前水位在 1 071.5~1 075.0 m,沙峰先于洪峰出现,入库泥沙输移动力得不到保障,逐渐在水库沉积下来,尽管之后来水增大,但水库进入蓄水阶段,坝前水位上升,水流流速下降,使得已经沉积的泥沙难以冲出库区。

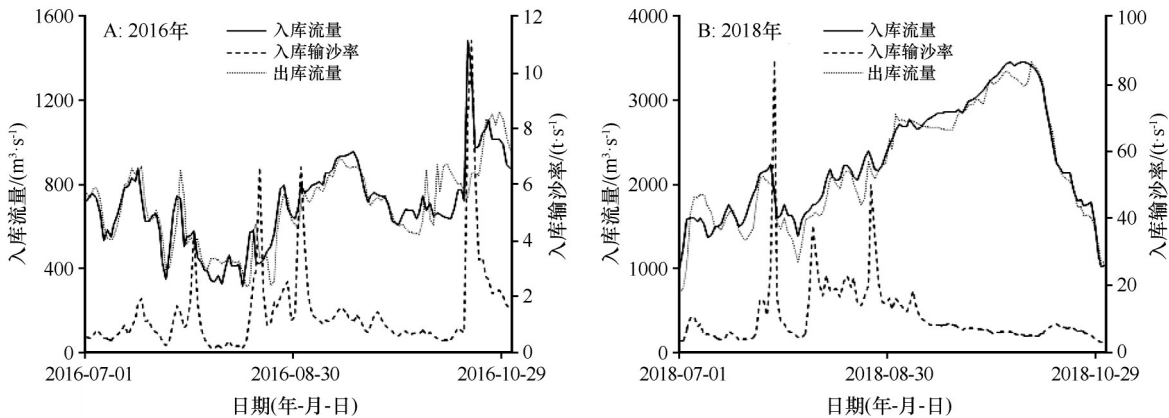


图 3 海勃湾水库典型年汛期入出库日均水沙过程

Fig.3 Average daily water and sediment flow in and out of Haibowan Reservoir during typical annual flood season

3.1.2 汛期大流量水沙条件

挑选石嘴山站 2014—2021 年每年汛期大流量过程,为使资料具有较好代表性,首先点绘历年汛期逐日流量和输沙率过程线,选择流量大于该年汛期平均流量且具有明显起涨、峰顶、峰谷的完整流量过程,然后将该流量过程的日均流量和输沙率分别累加,乘以 1 d 的时间,即得到各汛期大流量过程的水量和相应输沙量^[15]。

基于上述原则从 2014—2021 年入库水沙资料中挑选出 10 个汛期大流量过程,如表 2 所列,入库

平均流量越大,坝前水位越低,水库排沙比越大,相关系数 R^2 分别为 0.7、0.62,这一规律在整个汛期也较为明显,所不同的是汛期大流量过程中入库平均输沙率与水库排沙比也呈正相关关系, R^2 为 0.69,说明海勃湾水库在汛期大流量期间表现出“多来多排”的泥沙输移规律。

3.1.3 非汛期水沙条件

海勃湾水库冰凌期及蓄水发电期入库含沙量与排沙比呈负相关关系(图 4), R^2 分别为 0.71、0.84,说明在非汛期入库含沙量越大,水库排沙比越小。

表 2 2014—2021 年海勃湾水库汛期大流量过程排沙比统计

Table 2 Sediment discharge ratio statistics of Haibowan Reservoir during flood season from 2014 to 2021

| 年份 | 流量过程 | 入库 | | 坝前最低 水位/m | 出库 | | 排沙比 /% |
|------|-------------|---|--|--------------|---|--|-----------|
| | | 平均流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 平均输沙率 /($\text{t} \cdot \text{s}^{-1}$) | | 平均流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 平均输沙率 /($\text{t} \cdot \text{s}^{-1}$) | |
| 2014 | 10-18—10-26 | 1 332 | 3.470 | 1 073.0 | 1 317 | 0.416 | 11.99 |
| 2015 | 07-06—07-16 | 1 043 | 1.959 | 1 073.6 | 975 | 0.252 | 12.88 |
| 2016 | 09-05—09-18 | 884 | 1.271 | 1 073.5 | 851 | 0.139 | 10.97 |
| | 10-18—10-31 | 1 033 | 3.617 | 1 072.5 | 974 | 0.161 | 4.46 |
| 2017 | 10-10—11-07 | 1 216 | 2.601 | 1 074.3 | 1 169 | 0.305 | 11.89 |
| 2018 | 09-20—10-15 | 3 241 | 6.006 | 1 072.5 | 3 168 | 1.611 | 26.83 |
| 2019 | 06-27—07-25 | 2 747 | 6.856 | 1 069.1 | 2 613 | 2.792 | 40.73 |
| | 07-27—08-04 | 2 460 | 6.648 | 1 072.4 | 2 279 | 1.228 | 18.47 |
| 2020 | 08-10—09-11 | 2 990 | 6.691 | 1 071.0 | 2 927 | 2.980 | 44.54 |
| 2021 | 09-18—10-03 | 1 297 | 2.534 | 1 074.0 | 1 257 | 0.307 | 12.12 |

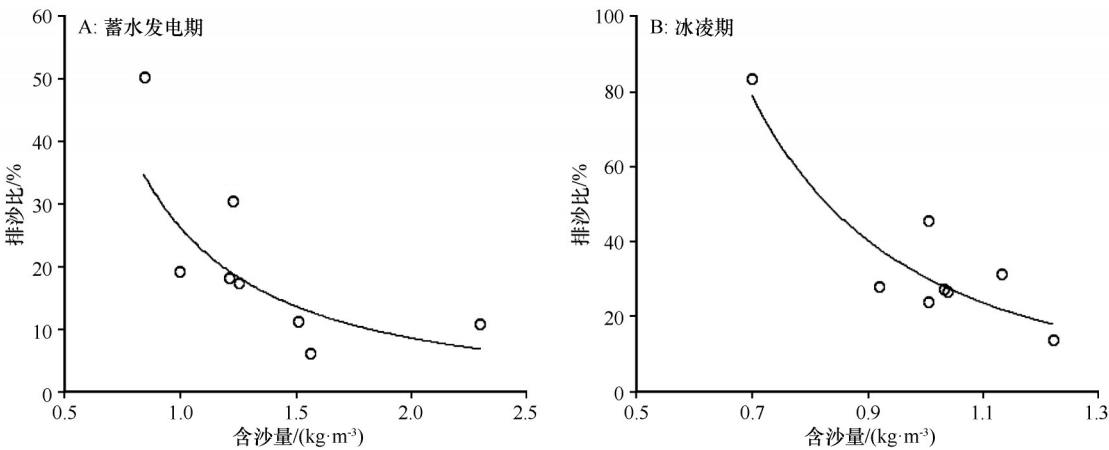


图 4 非汛期入库含沙量与排沙比关系

Fig.4 Relationship between sediment inflow and sediment discharge ratio in non-flood season

造成这种现象的主要原因是:水库蓄水发电时间长,水位变动幅度较小。3月底,2014—2016年水库水位基本蓄至1 073.5 m,2017—2021年蓄至1 075 m,一般到6月底都在进行蓄水发电任务,期间高水位运行时间长,入库流量较小,均值为 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,入库泥沙基本沉积在库区,水库排沙量极小;汛后11月至次年2月,水库多年坝前平均水位1 072.7 m,运行水位也偏高,同时为了保证黄河内蒙古河道防凌安全,控制最大下泄流量不超过 $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,当蓄水发电期及冰凌期水库来沙量越大,水库淤积量也越大,对应水库排沙比越小。

3.2 水库运行方式的影响

汛期运行水位对排沙比影响体现在偏高幅度

和持续时间2个方面。一方面,水库高水位降低水动力条件,导致泥沙输移动力不足,泥沙容易在库区沉积;另一方面,高水位运行时间长,即水库滞洪时间较长,增大了泥沙在库区沉积可能性。而滞洪时间可以通过 $V/(Q \cdot L)$ 来反映,其中 V 为水库蓄水量(滞洪库容), Q 为入库流量, L 为水库回水长度。计算同一水库长时段排沙时,排沙比与 V/Q 为单值关系^[16]。 V/Q 反映了泥沙在水库壅水段的停留时间,停留时间越长,泥沙淤积越多。滞洪库容可根据库容曲线插值求出。如图5所示,建立海勃湾水库汛期排沙比与滞洪时间的关系,呈现出随滞洪时间增加水库排沙比减小的规律,相关系数 R^2 为0.83,当 $V/Q>114 \text{ h}$ 时,水库排沙比不足10%,这种情况对海勃湾水库排沙是不利的。因此,海勃湾水库滞洪

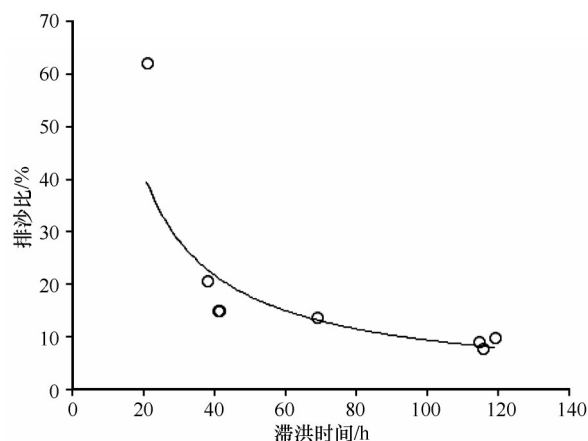


图5 海勃湾水库汛期排沙比与滞洪时间关系

Fig.5 Relationship between sediment discharge ratio and flood detention time in Haibowan Reservoir during flood season

时间较长,是影响排沙比变化的主要原因。

3.3 水库地形条件的影响

水库排沙比与库区河道输沙能力密切相关,河道输沙能力越强,水库排沙比越大^[17]。然而,在一定来水来沙条件下,库区河道水力特性,如河宽、过水断面面积、流速等变化直接影响输沙能力变化,即过水断面面积越大,水流流速越低,河道输沙能力越弱,泥沙输送出库的概率也越小。

海勃湾水库地形总体呈现上窄下宽、上陡下缓分布,距坝18 km处水面突然开阔,过水断面面积变大,库尾至坝前18 km库段流速为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,进入距

坝18 km后流速降至 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。根据水流挟沙能力可知,水流挟沙力与水流流速的三次方成正比^[18]。海勃湾水库坝前18 km范围内长期处于壅水状态,流速较小,水流挟沙能力下降,导致泥沙易于淤积而难以冲刷。此外,距坝0~18 km库段左岸分布着乌兰布和沙漠,乌海市春秋冬三季气候干燥且多风,多年平均风速 $16.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向多为WNW,易于扬起风沙落入库区,风沙粒径以大于0.1 mm的颗粒为主^[19],水库近坝库段难以产生足够动力冲出,对水库排沙不利。

河床比降越大水流流速越快。根据2014—2021年水库实测地形断面,计算各年1 076 m水位下各断面面积,除以相应库面宽,即得平均水深,再以计算水位减去平均水深即为断面平均库底高程,各断面平均库底高程连线为平均库底纵剖面线。其中2016年断面测量时间虽为汛期,但入库水沙量较小,与2014—2021年平均入库水沙量相比分别偏小41%、59%,尤其是入库沙量仅为0.24亿t,汛前汛后地形冲淤变幅不会太大,可与其年份地形进行对比分析。如图6所示,2014—2021年水库淤积增幅较大,尤其是2019年在距坝0~18 km库底高程陡增,平均河底高程增加了3.89 m,河床纵比降明显减小,水库输沙能力下降。2019年来水量是2014年来水量1.5倍之多,但排沙比较之却低了1.99%,说明水库纵比降也是影响海勃湾水库排沙效果的因素。

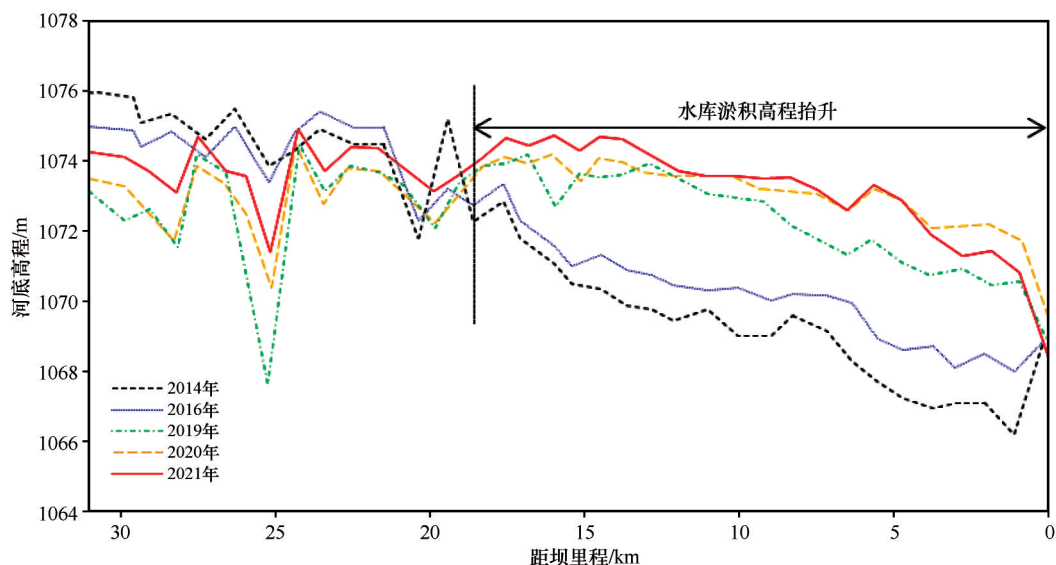


图6 2014—2021年海勃湾库区平均河底高程变化

Fig.6 Change of average river bottom elevation in the Haibowan Reservoir Area from 2014 to 2021

4 讨论

海勃湾水库排沙比变化受入库水沙量、入出库水沙峰协调性、坝前水位、滞洪时间、河道地形及乌兰布和沙漠影响,其中坝前水位无论在年际年内,还是汛期非汛期,均表现出坝前水位越低,水库排沙比越大的特性。选择可以量化的 2014—2021 年汛期月均滞洪时间、入库流量、坝前水位 3 个影响因素为自变量,以排沙比为因变量,将自变量的高阶项及交叉项引入到表达式中,构建多项式回归表达式如下:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 + \varepsilon \quad (1)$$

式中: y 为排沙比; x_1 为滞洪时间; x_2 为入库流量; x_3 为坝前水位; $a_i(i=0, 1, \cdots, 9)$ 为模型参数; ε 为随机误差。

借助 SPSS 统计分析软件对方程进行逐步回归计算,挑选出对因变量影响显著的自变量,剔除共线变量和不显著变量。结果表明滞洪时间 x_1 是海勃湾水库汛期洪水排沙比的主要影响因素,模型回归决定系数 R^2 为 0.79,方差膨胀因子 VIF 为 1.022,模型通过了 0.05 的显著性检验。为了进一步探究水库汛期排沙比和滞洪时间之间更优量化关系,根据二者在图 5 呈现出非线性关系,构建排沙比回归方程如下,回归决定系数 R^2 为 0.82,通过了 0.05 的显著性检验。

$$SDR = 3.74 \times \left(\frac{V}{Q}\right)^{-0.82} \quad (2)$$

由海勃湾水库预报入库流量及预设坝前水位,通过式(2)可计算出水库排沙比,其中水库坝前水位可由水库库容水位曲线插值得到。这说明式(2)能够用于预测水库不同控制水位下排沙情况,对海勃湾水库汛期调度有一定参考价值。

选择修建在黄河干流上的万家寨水库(峡谷型)与海勃湾水库对比排沙特性。万家寨水库也表现出排沙量与运行水位负相关关系,与径流量正相

关关系^[20],淤积部分集中于坝前库段,库尾段产生冲刷,难以出现“翘尾巴”现象,同时具备河道型水库特性,淤积和排沙都主要发生在汛期^[21]。但是两水库淤积和排沙特点不同,万家寨水库汛期来水含沙量较大,水库水深较大、断面窄深、纵比降陡,利于异重流运行^[22],同时在凌汛期降低水位运行,产生了大量排沙^[23],汛期水位变动幅度较大,能产生效果较好的冲刷效果^[24];而海勃湾水库库区水深较浅且坝前库段纵比降较小,挟有大量泥沙洪水进入水库壅水区后,难以与库内清水形成密度差,产生异重流机会较少,同时海勃湾水库水位变动幅度有限,不易产生具有较大冲刷强度的冲刷效果,此外海勃湾水库地形对库区水力分布特性产生很大影响,进而影响水库泥沙淤积,同时左岸乌兰布和沙漠持续增加着海勃湾水库泥沙淤积量。

在海勃湾水库初步设计阶段,采用数学模型和物理模型对海勃湾水库泥沙淤积和排沙比进行了系统研究,提出水库排沙调度运行方式为:7—9 月入库含沙量小于 $3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,水位 1 076 m 运行;8 月入库含沙量大于 $3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,水位 1 071 m 运行,7 月、9 月入库含沙量大于 $3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或入库流量大于 $1\,500\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水位 1 074 m 运行;7—9 月入库含沙量大于 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或入库流量大于 $2\,700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水位降至 1 069 m 泄水排沙。选择石嘴山站 1992—2002 年实测水沙数据作为设计水沙代表系列,10 年计算系列年均输沙量为 0.918 亿 t,结果表明,水库运行前 10 年排沙比为 45.5%~53.6%。

海勃湾水库蓄水运行 2 年后,韦诗涛等^[25]采用数学模型进一步对海勃湾水库泥沙淤积进行计算,选择石嘴山站 1968—2006 年及 1956—1966 年数据设计入库水沙过程,结果表明水库运行前 10 年排沙比为 58.6%。

综上所述,二者计算所得水库排沙比较实测值均有所偏大,如表 3 所列。海勃湾水库 2014—2021 年实测值与二者设计水沙均值系列相比,来水量偏

表 3 海勃湾水库入库控制站年均水沙量统计

Table 3 Statistics of average annual water and sediment volume of Haibowan Reservoir storage control station

| 时段 | 水量/亿 m ³ | | | 沙量/亿 t | | | 排沙比 /% |
|-------------------------|---------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------|
| | 年水量 | 汛期 | 非汛期 | 年沙量 | 汛期 | 非汛期 | |
| 1992—2002 年 | 211.7 | 91.8 | 119.9 | 0.919 | 0.626 | 0.293 | 45.5~53.6 |
| 1968—2006 年+1956—1966 年 | 265.9 | 153.1 | 112.9 | 1.272 | 0.973 | 0.298 | 58.6 |
| 2014—2021 年 | 303.2 | 147.2 | 156.1 | 0.581 | 0.374 | 0.207 | 19.35 |

大,来沙量偏小,排沙比偏小,未产生水库理想排沙效果。导致这一现象的主要原因是:一方面与水库调度运行方式有关,水库在汛期没有按照初设报告进行排沙调度,如2018年7—9月,水库含沙量均值 $5.95\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,坝前水位均值高达 $1\,074.1\text{ m}$,其中,8月1日至31日,入库流量为 $1\,390\sim 2\,540\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,日均含沙量均超过 $3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,日均最大含沙量 $21.53\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,坝前水位却在 $1\,073.3\sim 1\,075.0\text{ m}$ 区间运行;另一方面,入库水沙边界条件与实际情况偏差较大,从而导致模型计算值与实测值偏差较大。

海勃湾水库是黄河干流上受龙羊峡、刘家峡水库调节影响的梯级水库,水库设计使用年限20年,现已运行近半时间,而水库排沙比远小于初设值,导致泥沙淤积带来各方面负效应,特别是兴利库容不断损失,综合效益降低。水库排沙与运行水位、来水来沙密切相关,因此,建议水库在汛期大水大沙期间,尤其在水沙峰现协调时段,尽可能保持低水位高流速运行,避免或缩短水库滞洪时间,及时组织开展水沙调度工作,增大水库排沙比,增加库区有效库容,延缓水库淤积速度;同时针对左岸乌兰布和沙漠进行绿化,减少入库风沙量;必要时辅以人工挖沙或人为搅动排沙等手段,促使水库形成高滩深槽的地理形态,延长水库使用寿命。

5 结论

海勃湾水库汛期集中排沙现象突出,占年排沙量的60.39%。考虑乌兰布和沙漠风沙量,水库多年平均排沙比为19.35%,远小于设计排沙比45.5%~53.6%。汛期大流量期间表现出“多来多排”的泥沙输移特点。

海勃湾水库排沙比变化的核心控制性因素有3个。一是入库流量越大、入出库水沙协调性越好,则排沙比越大;二是水库长期处于高水位、小流量状态,尤其是汛期滞洪时间较长,泥沙在库区沉积概率大;三是水库地形上窄下宽、上陡下缓分布,乌兰布和沙漠风沙入库以及距坝0~18 km库段逐年淤积导致库区纵比降越来越小,泥沙易于淤积。

海勃湾水库汛期排沙比受滞洪时间影响较大,以滞洪时间为参数建立汛期排沙比经验公式,可用于预测不同控制水位的排沙情况。

海勃湾水库(平原型)与万家寨水库(峡谷型)排沙特性的共同点是受水沙条件、水位高低影响较

大,不同点是库区水力分布特性及风沙。与已有研究成果相比,水库实际排沙比偏小,主导因素是水库没有按照设计方案排沙调度以及入库水沙边界条件与实际偏差较大。

参考文献:

- [1] Yang S L, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 469–486.
- [2] Dahal S, Crosato A, Omer A Y A, et al. Validation of model-based optimization of reservoir sediment releases by dam removal[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021, 147(7): 4021033.
- [3] Brune G M. Trap efficiency of reservoirs[J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 1953, 34(3): 407–418.
- [4] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 265–266.
- [5] 张红武, 张欧阳, 张俊华, 等. 泾河东庄水库排沙试验研究[J]. *水力发电学报*, 2004, 23(4): 82–87.
- [6] 侯素珍, 胡恬, 杨飞, 等. 三门峡水库汛期排沙效果研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 393–400.
- [7] 金中武, 任实, 吴华莉, 等. 三峡水库淤积排沙及河型转化规律[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10): 9–15.
- [8] 陈桂亚, 袁晶, 许全喜. 三峡工程蓄水运用以来水库排沙效果[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 355–362.
- [9] 董占地, 胡海华, 吉祖稳, 等. 三峡水库排沙比对来水来沙的响应[J]. *泥沙研究*, 2017, 42(6): 16–21.
- [10] 朱玲玲, 许全喜, 董炳江, 等. 金沙江下游溪洛渡水库排沙效果及影响因素[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 544–555.
- [11] 傅旭东, 姜立伟, 吴保生, 等. 黄河下游河道场洪次洪水排沙比及其不确定性[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(4): 349–357.
- [12] 刘尚武, 张小峰, 许全喜, 等. 三峡水库区间来沙量估算及水库排沙效果分析[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(1): 28–38.
- [13] 陈琼, 刘晓民, 刘廷玺, 等. 海勃湾枢纽对坝后河道冲淤的影响[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(3): 139–147.
- [14] 李振全. 黄河石嘴山至巴彦高勒段风沙入黄量研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [15] 刘尚武, 张鹏, 苗蔚, 等. 嘉陵江不同区域场洪次洪水输沙规律[J]. *水科学进展*, 2022, 33(1): 38–47.
- [16] 龙孝平. 三峡水库排沙比与水沙响应关系研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [17] Haghjoui H, Rahimpour M, Qaderi K, et al. Experimental investigation of the diameter and length effects of the dendritic, bottomless, extended structure on reservoir sediment removal efficiency by flushing[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2022, 45: 15–28.
- [18] 郜国明, 谈广鸣, 李涛, 等. 小浪底水库排沙指标及2015年应用分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019(2): 275–283.
- [19] 田世民, 郭建英, 尚红霞, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄量研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(7): 65–70.

- [20] 侯素珍, 胡恬, 路新川, 等. 万家寨水库排沙运用效果分析[J]. 泥沙研究, 2021, 46(6): 9-15.
- [21] 任智慧, 王婷, 曲少军. 万家寨水库库区冲淤特点分析[C]//水库大坝高质量建设与绿色发展: 中国大坝工程学会 2018 学术年会论文集, 2018.
- [22] 任红俊, 刘页清, 路新川. 万家寨水库泥沙淤积分析[J]. 电力学报, 2005, 20(4): 438-440.
- [23] 陆宗磐, 贾世良, 任红俊. 万家寨水库初期运用及泥沙冲淤分析[J]. 水利水电工程设计, 2006, 25(4): 17-19.
- [24] 任红俊, 熊运阜. 万家寨水库淤积现状及排沙方案探讨[J]. 山西水利, 2002 (6): 49-50.
- [25] 韦诗涛, 梁艳洁, 陈翠霞. 黄河海勃湾水库排沙运用方式研究[C]//水库大坝高质量建设与绿色发展: 中国大坝工程学会 2018 学术年会论文集, 2018.

Effect and influencing factors of sediment discharge in Haibowan Reservoir

Wang Kezhi¹, Liu Xiaomin^{1,2,3}, Liu Tingxi^{1,2}, Yang Yaotian^{2,3,4}, Luo Qiang⁵

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, China; 3. Inner Mongolia Yellow River Ecological Research Institute, Hohhot 010020, China; 4. Inner Mongolia Jinhua Yuan Environmental Resource Engineering Consulting Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 5. Yellow River Haibowan Water Conservancy Project Development Center, Wuhai 016000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Haibowan Reservoir is a leading reservoir in the Inner Mongolia section of the Yellow River, and its sediment discharge effect has an important impact on the operation of the reservoir and the sediment deposition in the Inner Mongolia section of the Yellow River. The sediment discharge ratio of the reservoir is a key indicator to describe the sediment transport characteristics of the reservoir. The larger the sediment discharge ratio, the smaller the proportion of sediment in the reservoir. Based on the measured data of Haibowan Reservoir from 2014 to 2021, the characteristics of sediment discharge were analyzed, and the main factors affecting the change of sediment discharge ratio were discussed by correlation analysis. The results show that the annual average sediment discharge ratio of the reservoir is 19.35%, which is obviously smaller than the design value, and the ideal sediment discharge effect is not produced. The siltation and sediment discharge mainly occur in flood season, and the characteristics of "more coming and more discharging" are presented during large discharge period. The change of sediment discharge ratio is mainly affected by the water and sediment conditions, the operation mode of the reservoir and the topography. The sediment discharge ratio has a positive correlation with the inflow flow and the coordination of water and sediment in and out of the reservoir, and has a negative correlation with the water level in front of the dam and the flood detention time. The distribution of the reservoir topography is narrow at the top and wide at the bottom, steep at the top and slow at the bottom, and the inflow of wind-blown sand in the Ulanbu Desert have a negative impact on the sediment discharge ratio. The regression analysis shows that the sediment discharge ratio in flood season is mainly affected by the flood detention time and the empirical formula for sediment discharge ratio in flood season is established. The results can provide reference for the optimization of water and sediment control in Haibowan Reservoir.

Key words: sediment discharge ratio; inflow flow; flood detention time; Haibowan Reservoir