

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2019.0021

闫振峰,马怀宝,蒋思奇.虹吸式管道排沙技术在西霞院水库清淤中的试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):150-156. YAN Z F, MA H B, JIANG S Q. Application of siphon pipe sediment-discharging technology in dredging of Xixiyuan reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 150-156. (in Chinese)

虹吸式管道排沙技术在西霞院水库清淤中的试验研究

闫振峰^{1,2}, 马怀宝^{1,2}, 蒋思奇^{1,2}

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 水利部 黄河泥沙重点实验室, 郑州 450003)

摘要:为研究虹吸式管道排沙技术在西霞院水库清淤中的应用及效果,基于水库库区现场的清淤试验,利用西霞院水库上下游水位差的虹吸作用,辅以破土射流冲刷吸泥头扰沙,通过对输沙管道沿程含沙量和流量等特征值的跟踪监测,研究单泵及双泵串联条件下,200、220、230、240、250、300和330 m³/s共7个流量级不同试验工况下测点含沙量的变化范围、趋势及粒径级配等,并对试验清淤效果进行定量分析。水库清淤的现场试验结果表明:随着虹吸式管道排沙试验的工况流量不断增大,所测的平均含沙量呈现出增大趋势,而最大含沙量呈现先增大后减小的趋势,整个试验过程最大含沙量达到342.61 kg/m³,清淤2 000 m³泥沙的生产成本为10.56万元。

关键词:虹吸式;管道排沙;水库;清淤;成本

中图分类号:TV145 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of siphon pipe sediment-discharging technology in dredging of Xixiyuan reservoir

YAN Zhenfeng^{1,2}, MA Huaibao^{1,2}, JIANG Siqi^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Yellow River Sediment Research of MWR, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to study the application and effect of siphon-type pipe sediment-discharging technology in dredging of Xixiyuan reservoir in the middle reaches of the Yellow River, based on the on-site dredging test at the reservoir, we utilized the siphon effect of the water level difference between the upper and lower reaches of Xixiyuan reservoir, along with soil breaking jetting suction drag head for sediment regulation. Through tracking and monitoring the characteristic values such as sediment concentration and flow rate along the sediment transport pipeline, we studied the sediment concentration variation range, trend, and particle size gradation at the measured point under different test conditions, and carried out quantitative analysis of the dredging effect in the test. The results showed that: with the increase of the flow rate, the average sediment concentration would increase while the maximum sediment concentration would increase first and then decrease. The maximum sediment concentration throughout the test reached 342.61 kg/m³. The production cost for dredging 2 000 m³ sediment was 105 600 yuan.

Key words: siphon-type; pipeline sediment-discharging; reservoir; dredging; cost

收稿日期:2018-08-02 修回日期:2018-11-07 网络出版时间:2018-11-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181116.1520.004.html>

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407404);国家自然科学基金(51609095);黄科院中央级公益性科研院所基金项目(HKY-JBYW-2018-13)

作者简介:闫振峰(1986—),男,河南平舆人,工程师,主要从事水库泥沙方面研究。E-mail:742701688@qq.com

虹吸式管道排沙,是利用水库上下游水位差的虹吸作用,吸送水库泥沙至坝下游。水力吸送装置,由吸送管路(包括吸沙头及管路)、操作船(包括移位系统缆装置)、机械或水力松土造浆装置、排沙建筑物(包括与管路连接装置)等组成^[1-4]。整个装置组成与机械清淤设备相似,最大区别是动力装置简化,吸送管常悬浮在水中^[5-6]。

近年来,虹吸式管道排沙技术研究取得很多成果,也开展了很多试验。山西省水科所通过研究红旗水库虹吸式排沙试验,分析了其排沙效果和经济效益^[7];黄河水利委员会宁蒙水文局于2008年在青铜峡水库进行了虹吸式排沙初步试验,尽管输沙管仅采用直径9 cm壁厚6 cm的塑料管,采集的含沙量也不高,最大仅为 117 kg/m^3 ,但是为以后的试验研究做了很多有价值的工作^[8];曾杉等^[9]通过水工模型试验,研究了水库虹吸式排沙管道吸泥头的结构型式和操作方式对排沙效率的影响;陈成林等^[10]

针对大库盘水库泥沙淤积严重的情况,研究了虹吸式管道排沙不同流量含沙量条件下的排沙效果。

虹吸式管道排沙在大型水库的工程经验相对较少,为研究虹吸式管道排沙技术在大型水库清淤中的应用及排沙效果,本文以黄河中游西霞院水库库区清淤为例,介绍本次大型水库清淤中所运用的虹吸式管道排沙技术。通过对清淤过程中的含沙量、流量及流速等检测,分析本次水库清淤效果及经济成本。

1 西霞院水库概况

1.1 库区概况

西霞院水库是黄河小浪底水利枢纽的反调节水库,水库位于河南洛阳境内的黄河干流上,坝址左、右岸分别为洛阳市吉利区和孟津县,上距小浪底水利枢纽16 km,下距花园口145 km,是当前黄河干流上建设的最后一座水库,库区平面图见图1。

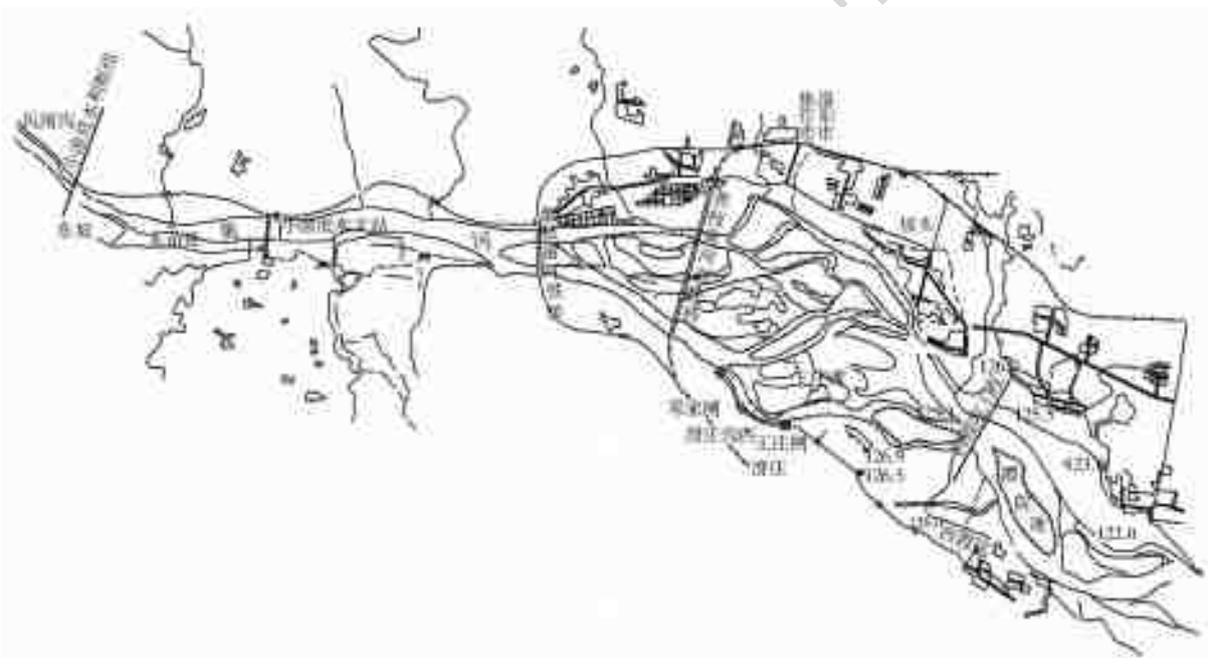


图1 西霞院水库库区平面图
Fig.1 Plan of Xixiayuan reservoir area

1.2 水库水文泥沙特性

西霞院反调节水库校核洪水位134.75 m以下总库容1.62亿 m^3 ,水库正常蓄水位134 m以下库容为1.45亿 m^3 ,淤积平衡后库容为0.45亿 m^3 ,库水位131.00~134.00 m的反调节库容0.33亿 m^3 。水库库容的绝大部分集中于水库的下半段^[11-13]。其中,距坝7.55 km以下库段的库容为1.33亿 m^3 ,占总库容的91.70%;距坝7.55 km以上的库容为0.12亿 m^3 ,占总库容的8.31%。支流库容占总库容的比例很小,正常蓄水位134 m以下的支

流库容仅为0.006亿 m^3 ,占总库容的0.41%^[14-16]。

据小浪底水文站1919—1998年实测资料系列统计,多年平均输沙量为13.25亿t,多年平均含沙量为 33.4 kg/m^3 ^[17]。其中,汛期输沙量为11.44亿t,占年输沙量的86.3%,汛期平均含沙量为 49.62 kg/m^3 ;非汛期输沙量为1.81亿t,占年输沙量的13.73%。8月份输沙量5.07亿t,占汛期的44.51%^[18-19]。

西霞院反调节水库泥沙直接受三门峡和小浪底

两个大型水库调节影响,库区支流泥沙入库甚少。库区最大支流砚瓦河在汛期洪水期间,河底有少量砂卵石推移,年推移输沙量约为 0.20 万 t^[20]。

1.3 库区淤积情况

截止 2016 年汛前西霞院水库累计淤积 0.20 亿 m³,年均淤积量约为 254 万 m³,其中 2010 年淤积量最大为 0.17 亿 m³,2009、2011、2015 年度淤积量减少^[21-23]。

西霞院水库的淤积主要集中在坝前漏斗断面、距坝 8 000 m 以内以及距坝 10 000 m 左右范围内,平均淤积厚度约为 4 m。距坝 7 580 m 范围内淤积量较大为 2 308 亿 m³,其中 LD04 至 LD08(距坝 180~430 m)左岸淤积厚度在 6.5~8 m 范围内,右岸淤积厚度在 2 m 左右,淤积量为 130 亿 m³,LD09 至 LD13(距坝 430~920 m)断面淤积厚度在 2~4 m 范围内,淤积量为 143 亿 m³^[24]。

2 水库虹吸式管道排沙试验

2.1 试验方案线路布设

西霞院水库 LD09 至 LD13 断面起点距 1 700~2 000 m 淤积面高程约为 128.50 m,淤积厚度约为 3~5 m。初步选取距离大坝 530.00 m 附近 LD09 断面,左岸起点距约 1 800 m 位置为水库清淤作业区。LD09 作业区原始河床高程约 123.00 m,滩面高程约 127.30 m,本次取沙水深约为 7.00~11.00 m,取沙厚度约为 4 m。

考虑水库运行和天气原因等因素,拟定在汛后开展西霞院水库泥沙处理与利用示范,受清淤时间及运行经费的控制,本次示范清淤规模拟定为 2 000 m³。

鉴于沉沙池修建占地维护等问题,结合黄河水利水电开发总公司相关部门意见,确定南岸过坝方案为本次示范的实施方案。

2.2 泥沙取输平台设计

由于现场没有合适船舶或浮体满足上述要求,因此,专门设计了一艘三浮体对称式船舶平台,见图 2。该平台总宽 7 m,型深 1.20 m,总长 16.50 m,总面积约 110 m²,重约 30 t。其中,主浮体 1 个,长 11 m,型宽 3.50 m,主要安装砂砾泵、高压水泵、发电机和操作控制系统;主浮体两侧对称安装了 2 个边浮体,主要用来增加平台的浮力和满足平台稳定性,提高抽沙安全性能。边浮体长 16.50 m,型宽 1.75 m,各浮体之间用专用连接件在水上连接。

抽沙平台的设计与建造参照船舶有关设计规

范,从艏至艉分别布置抽沙吸水钢管、吊架及卷扬机、抽沙泵组、排沙管路、柴油发电机组、操作控制室、挂浆机等。

吸水钢管由吊架悬吊,通过卷扬机控制吸头入水深度,使吸水口始终贴近河床。为减轻起吊架受力,在吸头安装一个浮筒,通过调节浮筒中的水量,使浮筒处于不同状态。浮筒空载时,浮筒上浮抬升吸头,减轻吊架受力;当浮筒充满水时,增加吸头重量,使吸头贴近河床。由于浮筒体积较大,可有效避免吸头淤积到泥中(图 3)。



图 2 取沙平台

Fig. 2 Sand pumping platform



图 3 水上浮筒与管道

Fig. 3 Water buoys and pipes

2.3 吸泥头设计

西霞院水库坝前淤积物干容重较大、颗粒极细^[25]。因此,西霞院管道排沙系统吸泥头设计考虑破碎固结泥块的设施,设计安装破土铰刀。吸泥头上需要布设控制闸阀,以应对突发性淤堵等安全事件。基于此,参考已有工程实践,设计了破土射流冲吸式吸泥头。

破土射流冲吸式吸泥头如图 4 所示,吸泥头壳体材料为 Q235B 钢板,厚度 4 mm;钢板间全部采用水密焊接,破土铰刀采用铰接座板连接。

利用自动升降仪控制管道进口高程,控制抽沙泵,通过连接冲沙管的三孔冲沙嘴冲击床底泥沙,结

合破土刀板破碎固结泥块,扰动床底泥沙悬浮。将监测到的含沙量反馈给水面操作船控制室,控制室指挥浮筒上的自动升降仪,实时调整管道进口高程,进而调整进入管道的水流含沙量。

利用自动升降仪控制管道进口高程,控制抽沙泵,通过连接冲沙管的三孔冲沙嘴冲击床底泥沙,结合破土刀板破碎固结泥块,扰动床底泥沙悬浮。将监测到的含沙量反馈给水面操作船控制室,控制室指挥浮筒上的自动升降仪,实时调整管道进口高程,进而调整进入管道的水流含沙量。

2.4 排沙系统设计

本次管道设计为 200 mm 管径,输送距离 2.40 km,如果输送流速 2.00 m/s,最大需采用扬程 71.20 m 水头。为此,采用扬程 40 m 两级泵串联,抽沙系统两台串联泵规格型号见表 1。

表 1 抽沙系统两台串联泵规格型号
Tab. 1 Specifications of the two series-connected pumps of the sand pumping system

泵型	额定流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	扬程/ m	转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	电机 功率/kW
200PN-35 型卧式沙砾泵	400	40	1 480	90
200ZE-45 型沙砾泵	400	41	1 160	110

排沙系统是整个抽沙与排沙的核心设备,抽沙泵组包括抽沙泵、高压射流冲沙泵、高压清水泵。为试验不同工况的抽沙效果,水泵采用皮带传动,水泵有 3 种直径的皮带轮,通过改变水泵皮带轮直径,改变泵的转速,获得不同的输送速度,取得不同的抽沙效果。

为取得良好抽沙效果,在吸泥平台上专门安装了一台高压水泵,利用高压水射流冲击库底淤积泥沙。高压清水泵的型号 65-200,功率 30 kW,流量 100 m^3/h ,扬程 80 m。

2.5 管道布设

管道在水面布置采用浮筒支撑的方法连接管道,见图 3。

岸上管道起点位于大坝南引水口南侧 10 m 处,终点位于西霞院渡口右侧空地长度 1.60 km,管径均为 219 mm,如图 4、5,管道连接形式采用对口法兰连接。沿引水闸南电缆线过坝,翻坝后,沿河右岸景区路边、黄河南岸护堤铺设管道。坝顶最高点、最低点和过坝后道路段管道每 200 m 各安装压力阀和排水阀一组,以便观测管道压力变化和管道含沙量。坝前、后各安装事故阀,以免意外停泵时管道淤积堵死。



图 4 坝上管道铺设

Fig. 4 Pipe laying on the dam



图 5 坝下管道铺设

Fig. 5 Pipe laying under the dam

2.6 方案设计

为试验不同工况的抽沙效果,水泵采用皮带传动,水泵有 3 种直径的皮带轮,通过改变水泵皮带轮直径,改变泵的转速,获得不同的输送速度,取得不同的抽沙效果,设计了 200、220、230、240、250、300 和 330 m^3/h 共计 7 个流量级工况。试验工况组次见表 2。

表 2 西霞院水库管道抽沙试验工况设计
Tab. 2 Conditions for pipeline sediment-discharging test at Xixiayuan reservoir

抽沙方式	工况	转速/($r \cdot min^{-1}$)	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
单泵 (200PN-35 型)	1	1 480	250
	2	840	200
单泵 (200ZE-45 型)	3	993	240
	4	1 160	220
	5	1 480/840	300
双泵串联	6	1 480/993	230
	7	1 480/1 160	330

3 试验清淤效果分析

3.1 含沙量分析

根据实测的含沙量和流量资料,计算管道进口和管道出口相同时间段内的输沙量,以出口与进口

单位时间的输沙量之比作为管道排沙比。

由于泥浆泵从河底抽取的泥浆浓度随机,测点的含沙量也不稳定,所以将 3 个测点含沙量的均值作为该断面的含沙量,进出口含沙量的均值作为这组试验的含沙量,根据试验 7 个工况的测试,对实测含沙量进行分析,得出如下结果。

泥浆泵从河底抽取的泥浆浓度随机,每个断面上中下三个测点的含沙量也很不稳定;泥浆泵的间歇性工作特征,且测点含沙量取样时间的确定性,每组工况含沙量变化范围非常大,从 4.40 kg/m^3 到 342.61 kg/m^3 ,工况 1 出口 11 时 30 分所测平均含沙量出现 4.40 kg/m^3 ,7 个工况所测平均含沙量为 147.56 kg/m^3 ;

各工况下,由于沿程的淤积,出口实测平均含沙量均小于进口实测平均含沙量;除了工况 4,其余各

工况出口实测最大含沙量均小于进口实测最大含沙量;随着流量的增大,所测平均含沙量呈现增大趋势,最大含沙量呈现先增大后减小的趋势;各工况不同时刻中值粒径的取值范围也有波动,分析进出口的颗粒级配情况,并未发生明显的细化现象。

3.2 清淤效率分析

根据 2016 年 10、11 月的 7 次工况的实测含沙量和流量资料(见表 3),整体来说,每个工况平均运行时间达到 371 min,运行时间最长的工况 7 为 393 min,运行时间最短的工况 3 为 355 min,各工况运行时间相差不大。7 个工况虹吸式管道排沙耗水共计 8 594.63 t,排沙量共计 2 720.12 t,工况 1 和工况 2 的排沙耗水率相对较大,超过 21,最小排沙耗水率为工况 7,为 3.53。

表 3 西霞院水库不同工况清淤情况

Tab. 3 Dredging situations of Xixiyuan Reservoir under different test conditions

工况	运行时间/min	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	阻力系数/%	耗水量/t	排沙量/t	排沙耗水率
1	365	250	44	1.40	1 481.90	165.17	21.28
2	362	200	37	1.57	1 020.84	112.08	21.17
3	355	240	105	1.41	1 320.60	372.01	8.53
4	372	220	104	2.04	1 424.76	372.11	9.11
5	381	300	132	1.97	998.22	453.71	5.29
6	367	230	118	1.91	968.88	340.89	6.82
7	393	330	147	3.93	1 379.43	904.15	3.53
合计					8 594.63	2 720.12	

从工况 1 和工况 3,工况 2 和工况 4 的试验结果对比可以分析出,当工况流量不大于 $250 \text{ m}^3/\text{s}$,随着含沙量的增大,排沙量有明显增大的趋势;而从工况 6 与工况 3、工况 4 的试验结果对比可以分析出,当工况流量不大于 $120 \text{ m}^3/\text{s}$,随着含沙量的增大,排沙量变化不是很明显,这说明当含沙量超过这一临界值时,随着流量的持续增大会加剧固体颗粒的相互碰撞,从而导致碰撞消耗的能量加大,阻力损失加大。

从工况 5 和工况 7 试验结果可以分析出,当含沙量大于 $130 \text{ m}^3/\text{s}$,且流量大于 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,随着流量的增大,在试验运行时间变化不大的情况下,排沙量从 453.71 t 陡增到 904.15 t,增大了将近一倍,而耗水量仅仅增加了 38.18%,排沙耗水率从 5.29 下降到 3.53,降低了 66.75%,这说明当试验工况含沙量较高,且流量相对较大时,随着流量的持续增大对固体颗粒的相互碰撞影响又有所减弱。

3.3 生产成本分析

根据西霞院水库清淤生产成本统计,抽沙固定

资产包括抽沙平台建造、抽沙管道及浮筒加工、抽沙平台现场组装、浮筒组装及水上管道布设、岸上管道布设、拆卸等。其中抽沙平台等建造费 42.7 万元,输沙管道等建造费 36.6 万元,管道调遣及组装等费用 16.3 万元,固定资产原值 $C_0=95.6$ 万元。

除国务院财政、税务主管部门另有规定外,机器、机械和其他生产设备等固定资产计算折旧的最低年限为 10 年,本次试验设备选取使用年限 t 预计为 10 年。根据市场调研及预测,取预计设备残值 C_m 收入 25 万元,预计清理费用 5 万元。变动成本中抽沙运行费包括生产占地费、人工费、水电费及税费等,合计 15 元/m^3 。

则固定成本折旧额为

$$C_g = \frac{C_0(C_m - C_q)}{t} = \frac{95.6 - (25 - 5)}{10} = 7.56 \text{ (万元)}$$

元)

生产成本

$$C = C_g T + C_b X = 10.56 \text{ (万元)}$$

清淤 $2\ 000 \text{ m}^3$ 泥沙的生产成本为 10.56 万元,即清淤 1 m^3 泥沙的生产成本为 52.80 元。

同已有水库清淤试验的清淤成本比较,本次虹吸式管道排沙试验清淤成本相对较低,见表4。

表4 已有水库清淤试验情况
Tab.4 Previous reservoir dredging tests

水库名称	所属流域	库容	清淤效果	清淤成本/ (元·m ³)
水槽子水库	长江	小I型	年清淤量 32 万 m ³	66
石岩水库	珠江	中型	清淤 160 万 m ³	54
通济桥水库	浙闽片河	中型	挖出淤泥 142 万 m ³	234
湖漫水库	浙闽片河	中型	清淤 51 万 m ³	61
太湖水库	浙闽片河	中型	清淤 24.75 万 m ³	134

4 结 语

(1)在黄河中游西霞院水库实施的虹吸式管道排沙试验,分析了各工况含沙量的变化情况、清淤效率和生产成本等,清淤试验结果表明:随着流量的增大,所测平均含沙量呈现增大趋势,最大含沙量呈现先增大后减小的趋势;当工况流量不大于 120 m³/s,随着含沙量的增大,排沙量变化不是很明显,而当含沙量大于 130 m³/s,且流量大于 300 m³/s 时,随着流量的增大,在试验运行时间变化不大的情况下,排沙量从 453.71 t 陡增到 904.15 t,增大了将近一倍,而耗水量仅仅增加了 38.18%,排沙耗水率从 5.29 下降到 3.53,降低了 66.75%。

(2)西霞院水库虹吸式管道排沙试验清淤 2 000 m³ 泥沙的生产成本为 10.56 万元,即清淤 1 m³ 泥沙的生产成本为 52.80 元,同已有水库清淤试验的成本比较来看,本次试验成本较低;但试验整体含沙量不是很高,最大含沙量也仅为 342.61 kg/m³,在后续的研究中,需要增加辅助设施来提高库区固结泥沙的启动效率。

参考文献(References):

[1] 舒大兴,戚振亚,吕殿荣. 水库水力自耕吸泥清淤装置研究[J]. 人民黄河,2014,36(12):138-139. (SHU D X, QI Z Y, LYU D R. Study on hydraulic dredging device for reservoir self-cultivation and suction[J]. People's Yellow River, 2014, 36(12): 138-139. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.100-1379.2014.12.042.

[2] 朱超,吴国英,陈融旭. 小浪底库区抽沙输沙试验工程布置研究[J]. 水电能源科学,2016,34(10):128-131. (ZHU C, WU G Y, CHEN R X. Study on the arrangement of sand and sediment test project in Xiaolangdi reservoir area[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10):128-131. (in Chinese))

[3] 胡春宏. 我国多沙河流域“蓄清排浑”运用方式的发

展与实践[J]. 水利学报,2016,47(3):283-291. (HU C H. Development and practice of the application method of "storage and drainage" in the Dusha River reservoir in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):283-291. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20151261.

[4] 谢金明,吴保生,毛继新,等. 泥沙淤积对水库影响的评估模型研究[J]. 水利发电学报,2012,31(6):137-142. (XIN J M, WU B S, MAO J X, et al. Research on evaluation model of sediment deposition on reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 137-142. (in Chinese))

[5] 陈建国,周文浩,韩闪闪. 黄河小浪底水库拦沙后期运用方式的思考与建议[J]. 水利学报,2015,46(5):574-583. (CHEN J G, ZHOU W H, HAN S S. Reflections and suggestions on the application of the Yellow River Xiaolangdi reservoir in the late stage of sand interception [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5):574-583. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20140767.

[6] 王增辉. 多沙河流水库异重流与溯源冲刷过程的数值模拟研究[D]. 武汉:武汉大学,2016. (WANG Z H. Numerical simulation of heterogeneous flow and traceability scouring process in the dusha river reservoir [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016. (in Chinese))

[7] 王梦婷,李琳,谭义梅,等. 正虹吸管道水力特性试验研究[J]. 水电能源科学,2014,32(12):87-90,98. (WANG M T, LI L, TAN Y M, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of positive siphon pipeline[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(12):87-90,98. (in Chinese))

[8] 罗大鑫. 管道排沙特性试验研究[D]. 天津:天津大学,2009. (LUO D X. Experimental study on sediment discharge characteristics of pipelines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))

[9] 曾杉,秦毅,李时. 小浪底水库泥沙管道高效输送的合理参数分析[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):156-163. (CENG S, QIN Y, LI S. Analysis of reasonable parameters for efficient transportation of sediment pipeline in Xiaolangdi reservoir [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 156-163. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.0024.

[10] 陈成林,夏新利,魏祖涛,等. 大库盘水库管道排沙系统试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(3):89-91. (CHEN C L, XIA X L, WEI Z T, et al. Experimental study on sediment discharge system of Dakuopan reservoir[J]. Journal of water resources and water engineering, 2011, 22(3):89-91. (in Chinese))

[11] 吴昊,范如琴,焦瑞峰,等. 黄河小浪底水文站河床淤积趋势分析[J]. 人民黄河,2008,30(6):37-38. (WU H, FAN R Q, JIAO R F, et al. Analysis of river bed

- erosion and siltation trend in Xiaolangdi hydrological station of the Yellow River[J]. Yellow River, 2008, 30(6): 37-38. (in Chinese))
- [12] 张俊华, 马怀宝, 王婷, 等. 小浪底水库支流倒灌与淤积形态模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 3(2): 1-4, 25. (ZHANG J H, MA H B, WANG T, et al. Model test of tributary backflow and siltation in Xiaolangdi reservoir [J]. Advances in Science and Advances in Science and Technology of Water resources, 2013, 33(2): 1-4, 25. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2013. 02. 001.
- [13] 王婷, 张俊华, 马怀宝, 等. 小浪底水库淤积形态探讨[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 710-717. (WANG T, ZHANG J H, MA H B, et al. Discussion on sedimentation form of Xiaolangdi reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 710-717. (in Chinese))
- [14] 顾霜妹, 赵连军, 董其华. 小浪底水库异重流排沙期下游洪峰增值特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(4): 113-115, 119. (Analysis of the value of the peak value of the downstream flood peaks in the Xiaolangdi reservoir during the sediment discharge period [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(4): 113-115, 119. (in Chinese))
- [15] 张俊华, 马怀宝, 夏军强, 等. 小浪底水库异重流高效输沙理论与调控[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 62-71. (ZHANG J H, MA H B, XIA J Q, et al. High-efficiency sediment transport theory and regulation of different gravity flow in Xiaolangdi reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 62-71. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170969.
- [16] 李涛, 张俊华, 夏军强, 等. 小浪底水库溯源冲刷效率评估试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 716-725. (LI T, ZHANG J H, XIA J Q, et al. Evaluation of traceability of traceability of Xiaolangdi reservoir [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 716-725. (in Chinese)) DOI: 10. 14042 / j. cnki. 32. 1309. 2016. 05. 009.
- [17] 申冠卿, 张原峰, 刘晓燕. 小浪底水库拦沙期黄河引水对河道泥沙输移影响机理探讨 [J]. 水利发电学报, 2014, 33(6): 136-141. (SHEN G Q, ZHANG Y F, LIU X Y. Discussion on the mechanism of the influence of the Yellow River diversion on the sediment transport in the channel of the Xiaolangdi reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6): 136-141. (in Chinese))
- [18] 王远见, 谢蔚, 王婷, 等. 小浪底水库库区支流拦门沙形成的主因分析[J]. 泥沙研究, 2016(6): 51-58. (WANG Y J, XIE W, WANG T, et al. Analysis of the main cause of the formation of the tributaries of the Xiaolangdi reservoir area [J]. Soil Research, 2016, (6): 51-58. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2016. 06. 009.
- [19] 张翔宇, 董增川, 马红亮. 基于改进多目标遗传算法的小浪底水库优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1): 65-68. (ZHANG X Y, DONG Z C, MA H L. Research on optimal dispatching of Xiaolangdi reservoir based on improved multi-objective genetic algorithm [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(1): 65-68. (in Chinese))
- [20] 李昆鹏, 马怀宝, 郜国明, 等. 黄河汛前调水调沙小浪底水库减淤影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, (4): 73-76, 81. (LI K P, MA H B, GAO G M, et al. Analysis of factors affecting siltation reduction in the Xiaolangdi reservoir of the Yellow River before the Yellow River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (4): 73-76, 81. (in Chinese))
- [21] 孙赞营, 李勇, 王开荣, 等. 1946 年以来黄河下游泥沙治理研究的主要进展[J]. 泥沙研究, 2017, 42(1): 73-80. (SUN Z Y, LI Y, WANG K R, et al. Major progress in sediment control research in the lower Yellow River since 1946 [J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(1): 73-80. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2017. 01. 012.
- [22] 翟家瑞. 西霞院水库汛期的优化调度[J]. 人民黄河, 2011, 33(7): 1-2. (ZHAI J R. Optimized dispatching of Xixiyuan reservoir in flood season [J]. Yellow River, 2011, 33(7): 1-2. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2011. 07. 001.
- [23] 李庆国, 安催花, 付健, 等. 西霞院水库运用方案分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 30-32. (LI Q G, AN C H, FU J, et al. Analysis of the application plan of Xixiyuan reservoir [J]. People's Yellow River, 2012, 34(8): 30-32. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2012. 08. 010.
- [24] 刘树君. 小浪底与西霞院水库联合优化调度[J]. 人民黄河, 2013, 35(2): 83-85. (LIU S J. Joint optimal dispatching of Xiaolangdi and Xixiyuan reservoir [J]. Yellow River, 2013, 35(2): 83-85. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2013. 02. 030.
- [25] 张俊华, 李涛, 马怀宝. 小浪底水库调水调沙研究新进展[J]. 泥沙研究, 2016, (2): 68-75. (ZHANG J H, LI T, MA H B. New progress in water and sediment adjustment research of Xiaolangdi reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 2016, (2): 68-75. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2016. 02. 012.