



船闸节水及用水保障方案研究

王勤振¹, 张瑶兰², 钱黎辉¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

摘要: 以浙赣运河常山江至省界段两梯级布置双线船闸为例, 开展船闸节水及集约用水保障方案研究。船闸节水推荐双线船闸互灌互泄省水方式, 通过两梯级双线船闸用水需求分析, 理论省水率可达 50%。综合考虑运河生态用水、航运用水需求, 结合沿线水资源量、水资源分布情况及地形地貌等因素, 对供水水源地进行研究分析, 提出域内新建水库、域内泵站提水、域外建库引水 3 种用水保障方案。根据各用水保障方案的建设内容和工程投资, 经技术经济比选, 船闸用水保障方案推荐域内泵站提水方案。

关键词: 船闸节水; 用水保障; 泵站提水

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0128-07

Water saving and water use guarantee solutions for ship lock

WANG Qinzhen¹, ZHANG Yaolan², QIAN Lihui¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Zhejiang Provincial Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310002, China)

Abstract: Taking the two-stage arrangement of double-lane ship locks in the section from Changshan River to the provincial boundary of the Zhejiang-Jiangxi Grand Canal as an example, this paper conducts research on the water-saving and intensive water use guarantee schemes for ship locks. For water-saving in ship locks, the method of mutual filling and emptying between double-lane ship locks is recommended. Through the analysis of water demand of the two-stage double-line ship locks, the theoretical water-saving rate can reach 50%. Considering the ecological water and shipping water demands of the canal, combined with factors such as the amount and distribution of water resources along the route, as well as topography and landforms, the water supply sources are studied and analyzed. Three water security schemes are proposed: constructing new reservoirs within the region, lifting water with pumps within the region, and building reservoirs and diverting water outside the region. Based on the construction content and engineering investment of each water supply guarantee scheme, and after technical and economic comparison, the scheme of lifting water with pumps within the region is recommended for the ship lock water supply guarantee.

Keywords: water-saving of ship lock; water supply guarantee; water lifting with pumps

水作为人类生活、工程建设、农业生产等最基本的需求, 对经济社会可持续发展起着至关重要的作用。随着水资源的需求量不断骤增, 不合理的控制使用导致水资源紧缺的问题愈发严重。如何节约集约高效利用水资源, 做好高质量水资

源供应是社会发展中必然面临的挑战^[1], 是当今社会亟待解决的重要问题。节约水资源在源头上需从减少水浪费、提高用水效率做起, 通过技术手段最大限度地实现水资源的可持续利用^[2]。集约利用水资源需最大限度地提高水资源利用效

收稿日期: 2024-09-03

作者简介: 王勤振 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事内河船闸、港口、航道水运业务研究。

率,减少浪费和损耗,实现更多的产出或服务。

《国家水网建设规划纲要》^[3]明确提出推进水网建设与内河航运等行业协同融合发展,发挥水网综合功能和效益。行业之间应妥善处理好用水需求衔接,结合区域水资源配置和约束,充分考虑水资源调配、节约集约高效用水等问题,开展精细化的水资源管理。内河航道、船闸的建设在满足交通航运用水需求的基础上,兼顾生态、水利防洪、引调水、灌溉等需求,做到节约集约高效用水。

1 船闸节水技术

1.1 船闸节水的主要方式

目前,国内外船闸节水的方式主要^[4]有以下几种:

1) 水头较高的船闸,采用连续多级船闸布置方式,降低水力指标、减小技术难度。连续布置的船闸级数达到3级及以上时,因每级船闸运行水头降低,船舶过闸时,闸室内部分水体保持相对不变,单次过闸耗水量仅为每次过闸时需交换的水量^[5],以达到节省船闸运行用水量的目的,见图1。

2) 船闸侧面布置省水池,利用省水池储存部分水体。灌泄水过程中通过闸室与省水池之间的水体输运实现部分水体的重复利用,减少船闸运行一次用水量,节省水资源,见图2。

3) 双线并列布置的船闸,输水系统可考虑双线船闸相互灌泄水省水运行方式,通过船闸及船舶的调度协调实现两船闸互灌互泄,节省船闸运行用水量,见图3。



图1 三峡连续5级船闸

Fig. 1 Three Gorges continuous five levels ship locks



图2 平陆运河马道双线船闸(三级省水池)

Fig. 2 Pinglu Canal Madao double-lane ship lock (three-level water-saving pool)

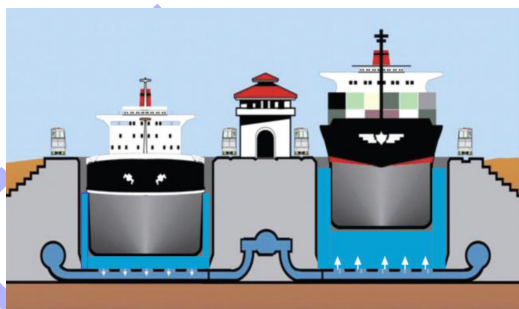


图3 巴拿马1号和2号船闸输水系统断面(互灌互泄)

Fig. 3 Cross-sectional of water conveyance system for Panama Locks No. 1 and No. 2 (mutual filling and emptying)

对于水资源自然禀赋较差^[6]、缺水严重的部分河流,采用省水船闸,可有效解决生态、农业、水利及航运用水间的矛盾,具有广阔的推广应用前景^[7]。

1.2 节水方案设计

1.2.1 单线船闸配备省水池

根据国外省水船闸研究经验,省水池面积一般等于闸室面积,且增加省水池级数的省水效果比增加省水池面积显著,但最多设置三级省水池,超过三级以后,省水效果明显下降。

以闸室一侧为例布置三级省水池,根据船闸省水运行时上游水位变幅范围,确定每级省水池的高程、水位及闸室水位分级^[8]。省水池之间采用隔墙分开,一级和三级省水池上下重合,省水池设置3支廊道与闸室底中段廊道相连,廊道采用阀门控制,见图4。

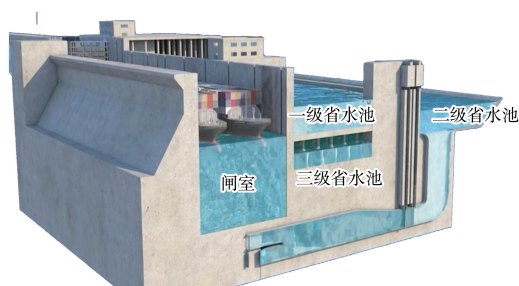


图4 省水池和闸室断面

Fig. 4 Water-saving pool and gate chamber cross-section

1.2.2 双线船闸互灌互泄

双线船闸并列对齐布置,在闸室中部将两船闸闸底主廊道通过2根横向联通廊道连接,并设置阀门控制,在一定水头范围内,通过一闸室向另一闸室注水,两闸室水位齐平后,再各自开启上、下阀门灌(泄)水,达到相应设计水位,见图5。

互灌互泄船闸属于省水船闸的特例,省水率高达50%,具有输水系统布置简单、节省水资源及工程投资、操作运行相对方便等优点。

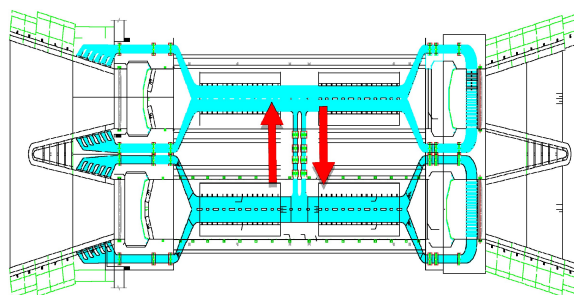


图5 双线船闸互灌互泄平面布置

Fig. 5 Layout plan of double-lane locks with mutual filling and emptying arrangement

2 船闸用水需求

2.1 船闸建设规模及梯级布置

浙赣运河常山江至省界段采用船闸进行通航,船闸等级为Ⅱ级。结合运量预测、船型分析,综合考虑检修期通航保障、船闸省水运行,经多种规模论证,船闸建设规模采用双线230 m×23 m×5.5 m(有效长度×净宽×门槛水深)。

综合考虑通航效率、航运用水保障及工程投资,推荐船闸采用两梯级方案,彤弓山、刘家畈枢纽见图6。

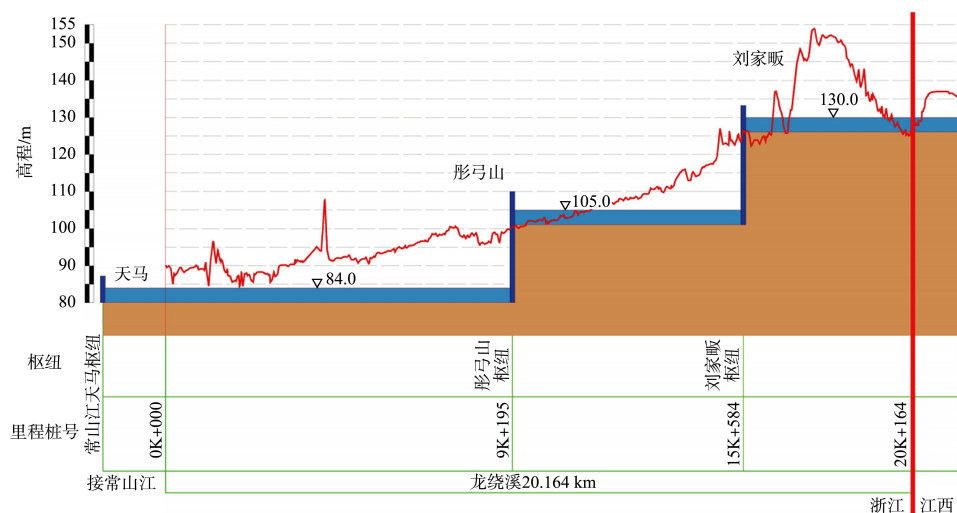


图6 两梯级方案规划断面

Fig. 6 Planning cross-section of two-stage scheme

2.2 船闸用水需求分析

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[9],船闸一天内平均耗水量按下式计算:

$$Q = \frac{nV}{86400} + q \quad (1)$$

$$Q = eu \quad (2)$$

式中: Q 为一天平均耗水量, m^3/s ; V 为一次过闸用水量, m^3 ; n 为日平均过闸次数; q 为闸门、阀门的渗漏损失, m^3/s ; e 为止水线每米上的渗漏损失, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 当水头小于 10 m 时取 0.001 5 ~ 0.002 0, 本次计算取 0.001 5 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; u 为闸门、阀门止水线总长度, m 。

船闸建设规模双线 230 m×23 m×5.5 m, 节水方式推荐采用双线船闸互灌互泄, 船闸耗水量见表 1。

表 1 双线 23 m 船闸省水运行船闸耗水量
Tab. 1 Water consumption for operation of 23 m double-lane locks

设计水平年	上下闸门水域长度/m	闸室宽度/m	梯级最大设计水头/m	一次过闸用水量/万 m ³	闸阀门止水线总长度/m	止水线每米上的渗漏损失/(m ³ ·s ⁻¹ ·m ⁻¹)	预测单向通过能力需求/万 t
2035 年	280	23	26	16.744 0	160	0.002 5	1 570
2050 年	280	23	26	16.744 0	160	0.002 5	2 070

设计水平年	船闸单向年通过能力/万 t	理论船闸日平均泄水次数/次	按运输需求反推日平均泄水次数(双线)/次	一天平均耗水量(双线)/(m ³ ·s ⁻¹)	省水率/%	省水后日均耗水量/(m ³ ·s ⁻¹)	年用水量 Q(对应 340 d, 双线)/亿 m ³
2035 年	1 219×2	12.46×2	16.05	31.50	50	15.75	4.626 7
2050 年	1 450×2	13.52×2	14.64	28.77	50	14.38	4.225 7

3 用水保障方案

3.1 水源地的选择

3.1.1 域内方案

常山江流域水资源丰沛, 域内运河沿线现有水库 20 座, 主要功能为供水、灌溉, 其中中型水库 1 座, 兴利库容 1 550 万 m³, 承担着千红灌区灌溉任务, 现状用水紧张, 不适宜作为航运用水保障水源。

小型水库 19 座, 由于兴利库容极小, 调节能力有限, 无法满足航运用水需求。

1) 结合域内水资源量、水资源分布情况及地形地貌等因素, 域内方案可考虑在常山江支流龙绕溪新建水库^[10]。龙绕溪径流量成果见表 2。

表 2 龙绕溪径流量成果
Tab. 2 Longrao Creek runoff results

名称	集雨面积/km ²	年均径流量/亿 m ³	多年年均流量/(m ³ ·s ⁻¹)
龙绕溪	125.6	1.5	4.75

2) 新建泵站由常山江干流提水至浙赣运河, 充分利用干流丰沛水资源满足运河用水需求。结合地形地貌、水利工程规划等因素, 泵站保障方案水源选择常山江干流规划的天马枢纽库区。常山江干流径流量成果见表 3。

表 3 常山江干流径流量成果
Tab. 3 Results of mainstream runoff in Changshan River

断面	集雨面积/km ²	年均径流量/亿 m ³	多年年均流量/(m ³ ·s ⁻¹)
天马枢纽坝址	2 337	27.6	87.5

3.1.2 域外引水方案

域外适合引水的大中型水库有齐溪水库、开化水库、茅岗水库, 现状水库群承担区域供水、灌溉及生态等用水, 任务重, 水量不富余且距离运河较远, 不适宜作为引水水源。

考虑域外水资源量、水资源分布情况及地形地貌等因素, 水量丰沛且引水地势合适的常山江支流有马金溪、池淮溪和龙山溪, 其径流量见表 4, 可在邻近运河的支流建水库引水, 满足航运用水需求。

表 4 域外水源径流量成果(水库方案)
Tab. 4 Results of extraterritorial water source runoff (reservoir scheme)

支流名称	集雨面积/km ²	年均径流量/亿 m ³	多年年均流量/(m ³ ·s ⁻¹)
马金溪	1 067	13.30	42.2
池淮溪	419	5.23	16.5
龙山溪	333	4.32	13.6

3.2 河道用水需求分析

3.2.1 域内新建水库方案

域内新建水库除满足运河航运用水需求外, 应满足运河生态用水等需求。根据 SL/T 712—2021《河湖生态环境需水技术规范》^[11], 生态流量设计保证率不小于 90%。水库采用枯水期(10 月—次年 3 月)按坝址平均流量的 20%泄放生态流量, 丰水期(4—9 月)按坝址平均流量的 40%泄放生态流量, 满足生态用水需求。

3.2.2 域内泵站提水方案

泵站提水方案取水水源为常山江干流天马枢

纽库区，首先应不影响天马枢纽航运用水和生态用水，其次满足运河航运用水及生态用水需求。天马枢纽航运用水需求见表 5。

表 5 天马枢纽船闸用水量估算
Tab. 5 Estimation of water usage for Tianma Hub Lock

船闸名称	正常蓄水位/ m	平均水头/ m	一次用水量/ 万 m ³	2035 年日用水量/ 万 m ³	2050 年日用水量/ 万 m ³
天马枢纽	84	5.5	2.807 2	11.664 0	42.508 8

天马枢纽生态用水近期为生态基流控制指标 2.59 m³/s；远期为生态基流控制指标 8.75 m³/s。

3.2.3 域外引水方案

常山江支流新建水库引水除满足运河航运用水需求外，应满足本流域生态用水需求，暂不考虑水库供水、灌溉等其他功能。

根据 SL/T 712—2021《河湖生态环境需水技术规范》，生态流量设计保证率不小于 90%。水库采用枯水期（10 月—次年 3 月）按坝址平均流量的 20%泄放生态流量，丰水期（4—9 月）按坝址平均流量的 40%泄放生态流量，满足生态用水需求。

3.3 用水保障方案

3.3.1 域内新建水库方案

根据梯级船闸布置方案和航运用水、生态用水需求，结合流域地形地貌及水资源分布，围绕浙赣运河现有河道走向的龙绕溪支流进行水源地选取，拟定在老鼠坞新建拦河坝，坝址集雨面积 32 km²，多年平均径流量 3 700 万 m³，规划坝址见图 7。



图 7 新建水库规划坝址
Fig. 7 Proposed dam site for new reservoir

3.3.2 域内泵站提水方案

根据拟定的两梯级船闸通航水位，浙赣运河河口梯级水位与天马枢纽正常水位 84 m 进行衔

接。泵站提水方案以常山江为水源，采用逐级泵站提水满足运河用水需求。单级泵站提水剖面见图 8。

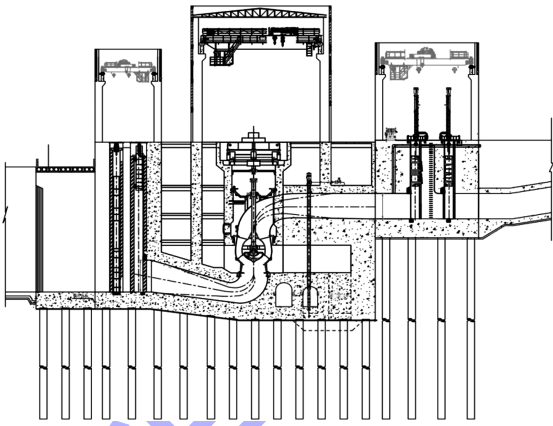


图 8 泵站提水剖面
Fig. 8 Section of pump station water lifting

3.3.3 域外建库引水方案

根据梯级船闸布置方案和航运用水、生态用水需求，结合流域地形地貌及水资源分布，水库保障方案 1 为大密赛水库方案；方案 2 为大长风水库方案；方案 3 为篁岸+三里亭+小密赛水库方案。

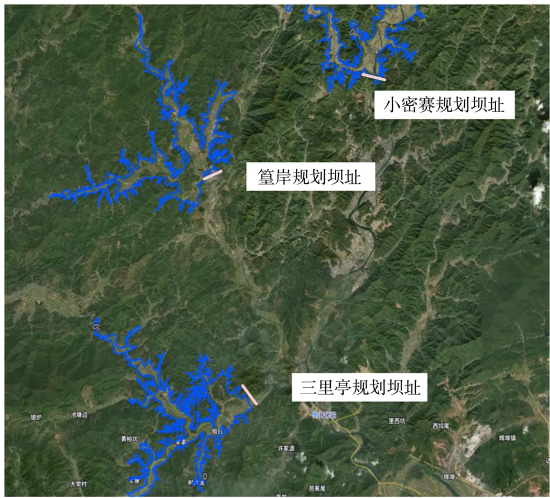
通过抬高水库正常蓄水位，增大兴利库容，增强水库调节能力，提升供水能力，进一步保障运河用水，各规划坝址位置见图 9。



a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3

图 9 不同方案规划坝址

Fig. 9 Planning dam sites for different schemes

3.4 用水保障方案比选

3.4.1 域内新建水库方案

充分利用龙绕溪本地水资源,考虑地质条件、库区限制性因素等,可新建拦河主坝 1 座,副坝 3 座,最大坝高为 35 m,水库正常蓄水位 160 m,总库容 4 250 万 m³。

龙绕溪新建水库方案供水能力为 7.2 万 m³/d,

远小于运河航运用水综合日需水量,无法满足运河航运用水需求。

3.4.2 域内泵站提水方案

考虑常山江过境水量丰富,采用逐级泵站由常山江干流提水,可保障运河用水需求。泵站方案由天马枢纽库区提水,提水量满足运河用水需求后,自流回归天马库区重复利用。结合梯级船闸布置方案,采取节水措施情况下,两级双线船闸泵站总装机约 15.6 MW,年运行电费约 6 930 万元/a,工程总投资约 9.83 亿元,项目运行期耗电量较大,年运行电费较高,投资效益比较低。

3.4.3 域外建库引水方案

域外选址建库方案 1、2、3 均能够满足生态、航运用水量和用水保证率要求。

根据生态、航运用水量,确定水库的必需库容,初拟各方案水库规模,按混凝土重力坝匡算工程投资,结合水库淹没范围,估算征地移民费用。各方案水库规模参数及总投资见表 6。

综合考虑工程投资、政策处理等因素,域外建库引水推荐方案 1,即大密赛水库方案。

表 6 各方案水库规模参数及总投资

Tab. 6 Reservoir scale parameters and total investment of each scheme

方案	水库名称	正常蓄水位/m	相应库容/亿 m ³	死水位/m	死库容/m ³	坝顶高程/m	最大坝高/m	总库容/亿 m ³
1	大密赛水库	192	14.88	140	0.83	197	67	16.73
2	大长风水库	148	21.59	140	13.47	153	58	25.28
3	簠岸+三里亭+小密赛水库	176	3.95	140	0.64	181	51	4.56
		162	3.65	140	0.79	167	57	4.26
		164	2.94	140	0.83	169	39	3.68
方案	水库名称	航运年供水量/亿 m ³		生态年供水量/亿 m ³		工程投资/亿元	征地移民费用/亿元	总投资/亿元
1	大密赛水库	5.31		2.61		18.0	218.6	236.6
2	大长风水库	5.31		7.36		13.6	1 316.5	1 330.1
3	簠岸+三里亭+小密赛水库	1.88		1.07		9.4	55.2	64.7
		1.84		1.00		14.1	91.4	105.5
		1.59		2.61		5.4	155.4	160.8

3.4.4 用水保障方案综合比选

综合域内、域外用水保障方案优劣势,分析比选情况见表 7。

根据各用水保障方案的建设内容和工程投

资,经技术经济比选,用水保障方案推荐域内泵站提水方案,后续需结合逐级泵站的水位、流量变幅,研究关注逐级泵站的提水效率及实际运行效率^[12]。

表 7 用水保障方案综合比选
Tab. 7 Comprehensive comparison and selection of water supply guarantee plans

方案		工程内容	工程投资/ 亿元	优点	缺点	推荐 方案
域内 方案	泵站 提水	新建泵站 6 座 总装机约 15.6 MW	9.83	投资较小,政策处理量和难度 均较低	运行期耗电量较大,年运行电费 较高	✓
域外 方案	建库 引水	新建重力坝 1 座新建隧 洞 30 km	236.6	重力流引水,运行期费用较低	投资大,且政策处理量和难度 较大	

4 结论

- 1) 船闸节水推荐双线船闸互灌互泄省水方式,通过两梯级双线船闸用水需求分析,理论省水率可达 50%。
- 2) 综合考虑运河生态用水、航运用水需求,结合沿线水资源量、水资源分布情况及地形地貌等因素,对供水水源地进行研究分析,提出域内新建水库、域内泵站提水、域外建库引水 3 种用水保障方案。
- 3) 根据各用水保障方案的建设内容和工程投资,经技术经济比选,船闸用水保障方案推荐域内泵站提水方案。

参考文献:

[1] 王永玲. 中国省域水资源承载力评价: 基于支持-压力耦合机制[J]. 统计与决策, 2024, 40(8): 68-73.
WANG Y L. Evaluation of water resources carrying capacity in provinces of China: based on support-pressure coupling mechanism [J]. Statistics and decision, 2024, 40(8): 68-73.

[2] 张瑞峰, 曹知真. 水资源节约集约利用的可行性分析与实施策略研究[C]//甘肃省水利学会. 中国水资源高效利用与节水技术论坛暨甘肃省水利学会学术年会论文集. 兰州: [出版者不详], 2023: 1-10.
ZHANG R F, CAO Z Z. Feasibility analysis and implementation strategy research on water resource conservation and intensive utilization [C]// Gansu Province Water Association. Proceedings of China Water Resources Efficient Utilization and Water-saving Technology Forum and Gansu Provincial Hydraulic Engineering Society Academic Annual Meeting. Lanzhou: [s. n.], 2023: 1-10.

[3] 中共中央 国务院. 国家水网建设规划纲要 [Z/OL]. (2023-05-25) [2024-04-10]. <https://faolex.fao.org/docs/>

pdf/chn217693.pdf.
Central Committee of the Communist Party of China, State Council. National water network construction planning outline [Z/OL]. (2023-05-25) [2024-04-10]. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/chn217693.pdf>.

[4] 中交水运规划设计院有限公司. 浙赣运河前期相关专题研究项目浙赣运河(衢州段)线路及梯级优化布置方案研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2023.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary research project on related topics of Zhe-Gan Canal: Study on the route and cascade optimization layout of Zhe-Gan Canal (Quzhou section) [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2023.

[5] 陈明, 吕森鹏, 刘原, 等. 省水船闸输水系统水力学研究综述[J]. 水运工程, 2021(9): 106-112, 119.
CHEN M, LYU S P, LIU Y, et al. Review of hydraulics investigations of filling and emptying system in ship locks with water-saving basins [J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 106-112, 119.

[6] 高旭艳. 石川河生态用水保障方案分析[J]. 陕西水利, 2022(2): 36-37.
GAO X Y. Analysis of ecological water use guarantee scheme for Shichuan River [J]. Shaanxi water resources, 2022(2): 36-37.

[7] 麦建清, 罗翔云, 王多银, 等. 白马枢纽省水船闸布置及输水水力特性初步分析[J]. 水运工程, 2019(4): 115-121.
MAI J Q, LUO X Y, WANG D Y, et al. Preliminary analysis on layout and water delivery hydraulic characteristics of water saving lock for Baima navigation junction [J]. Port & waterway engineering, 2019(4): 115-121.