

王林威, 苏柳, 谭培影, 等. 东平湖调蓄南水北调东线来水的可行性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 445-454. WANG L W, SU L, TAN P Y, et al. Feasibility on the use of Dongping Lake for the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 445-454. (in Chinese)

## 东平湖调蓄南水北调东线来水的可行性

王林威<sup>1,2</sup>, 苏柳<sup>1,2</sup>, 谭培影<sup>1,2,3</sup>, 明广辉<sup>1,2</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室, 郑州 450003; 3. 中国水利水电科学研究院博士后科研流动站, 北京 100048)

**摘要:**为充分发挥东平湖水库综合效益, 提高水库水安全保障韧性, 按照“以时间换空间”的思路, 提出利用东平湖富余库容调蓄南水北调东线来水的方案。结果表明: 东平湖 1956—2016 年月平均富余调节库容 1.17 亿 m<sup>3</sup>, 在大汶河来水偏枯、东平湖水位较低年份利用东平湖富余库容调蓄南水北调东线来水是可行的; 对比分析基准方案和 2 种方案实施后对湖周用水保证率、东平湖需水量、入黄水量、工程安全的影响后, 得到东平湖库容调蓄的最优方案。该方案不占用大汶河水指标, 同时最大增加了南水北调东线调蓄库容 3.62 亿 m<sup>3</sup>, 提高了调度灵活性, 为南水北调东线二期供水效益提升提供了新思路。

**关键词:** 富余库容; 调度规则; 综合效益; 东平湖; 南水北调工程

**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0046

受全球气候变化影响, 极端水文事件发生的频率和强度显著增加<sup>[1-2]</sup>, 流域水安全保障面临严峻挑战。南水北调工程是实现我国水资源优化配置、促进经济社会可持续发展、保障和改善民生的重大战略性基础设施<sup>[3-4]</sup>。东平湖是南水北调东线(以下简称“东线”)工程途经的最末一级蓄水湖泊, 原功能主要为蓄滞洪水<sup>[5-6]</sup>。东线工程实施后, 东平湖除调蓄黄河和大汶河洪水之外, 又承担着东线工程向鲁北、胶东等地输水的任务<sup>[7]</sup>, 其功能由单纯的防洪逐渐转变为以防洪为主, 兼顾调水、引水灌溉等综合功能, 发挥着综合利用的“水库”作用<sup>[8-10]</sup>。作为东线工程的最末一级调节湖和水源地, 东平湖调蓄调度运用直接关系到东线受水区的水安全, 在确保黄河下游防洪安全和水资源综合利用布局方面, 具有十分重要的地位<sup>[11-12]</sup>。东线一期工程入东平湖水量等于出湖水量, 并未考虑东平湖调蓄作用。黄河洪水、大汶河洪水、南水北调蓄水相互争夺东平湖库容, 导致其调蓄能力大幅度降低, 给蓄滞大汶河来水和分滞黄河洪水带来不利影响<sup>[13]</sup>, 因此东平湖水

库综合效益仍未达到最优化, 水库运用灵活度不高。

新形势下, 小浪底水利枢纽工程的运用减少了黄河下游超标洪水发生的可能性<sup>[14-15]</sup>; 大汶河来水作为东平湖直接水源, 来水高度集中于汛期, 非汛期来水较少<sup>[16-17]</sup>, 并且随着经济社会的快速发展, 用水需求不断增加, 大汶河实测入湖水量也呈现减少趋势<sup>[18]</sup>。历史上汶河大洪水与黄河大洪水也未发生相遇情况, 加之黄河下游标准化堤防、河道整治等防洪工程建设, 新形势下东平湖作为蓄滞洪区的机率下降<sup>[19-20]</sup>。这些均为东平湖调蓄东线来水提供了可能性。梁云等<sup>[21]</sup>通过分析新形势下东平湖功能定位差异, 从东平湖蓄滞洪区运用概率以及水库运行水位的角度出发, 探讨了将东平湖作为防洪、调蓄、航运、生态、养殖等多功能结合综合利用水库的可能性; 格菁等<sup>[22]</sup>提出了东平湖洪水资源化利用方案, 指出充分发挥东平湖调蓄作用, 可提升黄河流域可利用水资源, 缓解流域水资源矛盾, 实现可持续发展; 江恩惠等<sup>[13]</sup>指出在新形势下应赋予东平

收稿日期: 2023-09-06 修回日期: 2024-04-08 网络出版时间: 2024-05-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240523.1012.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200203); 河南省重大科技专项项目(201300311400)

作者简介: 王林威(1986—), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 46439267@qq.com

通信作者: 谭培影(1991—), 女, 河南漯河人, 工程师, 博士, 主要从事河流动力学研究。E-mail: tanpy1991@163.com

湖水库地位新内涵,综合考虑其分滞洪水、调配极端气候下涝水以及调蓄东线调水等作用,并提出通过改变东平湖运用模式,管理洪水、冲刷河道淤积的方案。这些研究均提出了提升东平湖水库功能的设想和思路,但未见到以提升东平湖调蓄能力为目的的可利用库容量化研究工作。

因此,基于“以时间换空间”的调度思路,提出在大汶河来水偏枯年份、东平湖水位较低年份利用东平湖富余库容调蓄东线来水的设想,提高东线调蓄灵活度和调水效益。以东平湖为研究区域,预测大汶河未来入湖水量,分析东平湖富余调蓄库容,论证利用东平湖调蓄东线来水的可能性;随后建立包含大汶河水、东线水、黄河水的河-湖-库-渠多水源联合调度规则和调蓄模型,通过多方案比选论证提出东平湖调蓄方案,实现东平湖水库综合效益最优化。在国家水网逐步构建的新形势下,研究成果可为提升水网调蓄节点灵活性和韧性提供思路,对

保障流域水安全具有重要意义<sup>[23-25]</sup>。

## 1 研究区概况和总体思路

### 1.1 研究区概况

大汶河是黄河下游最大的一条支流,位于山东省境内的黄河南岸,发源于沂源县,自东向西流入东平湖,出陈山口后注入黄河,流域面积 8 633 km<sup>2</sup>。东平湖滞洪区位于黄河由相对宽河段转为窄河段过渡段的黄河与大汶河下游冲积平原相接的洼地上。湖区总面积 626 km<sup>2</sup>,其中老湖区面积 208 km<sup>2</sup>。东平湖水库兴建后,进入控制运用时期,承担分滞黄河洪水、调蓄大汶河洪水的任务。东线一期工程入出东平湖线路见图 1。2013—2022 年累计入东平湖水量 41.67 亿 m<sup>3</sup>,累计调入胶东水量 31.84 亿 m<sup>3</sup>,穿黄水量 7.63 亿 m<sup>3</sup>。东线一期工程运行过程中,汛期调水占用东平湖防洪库容,增加防洪运行管理成本等问题逐渐显现,东平湖水库调度方案是否合理成为影响水库效益最大化的主要因素。

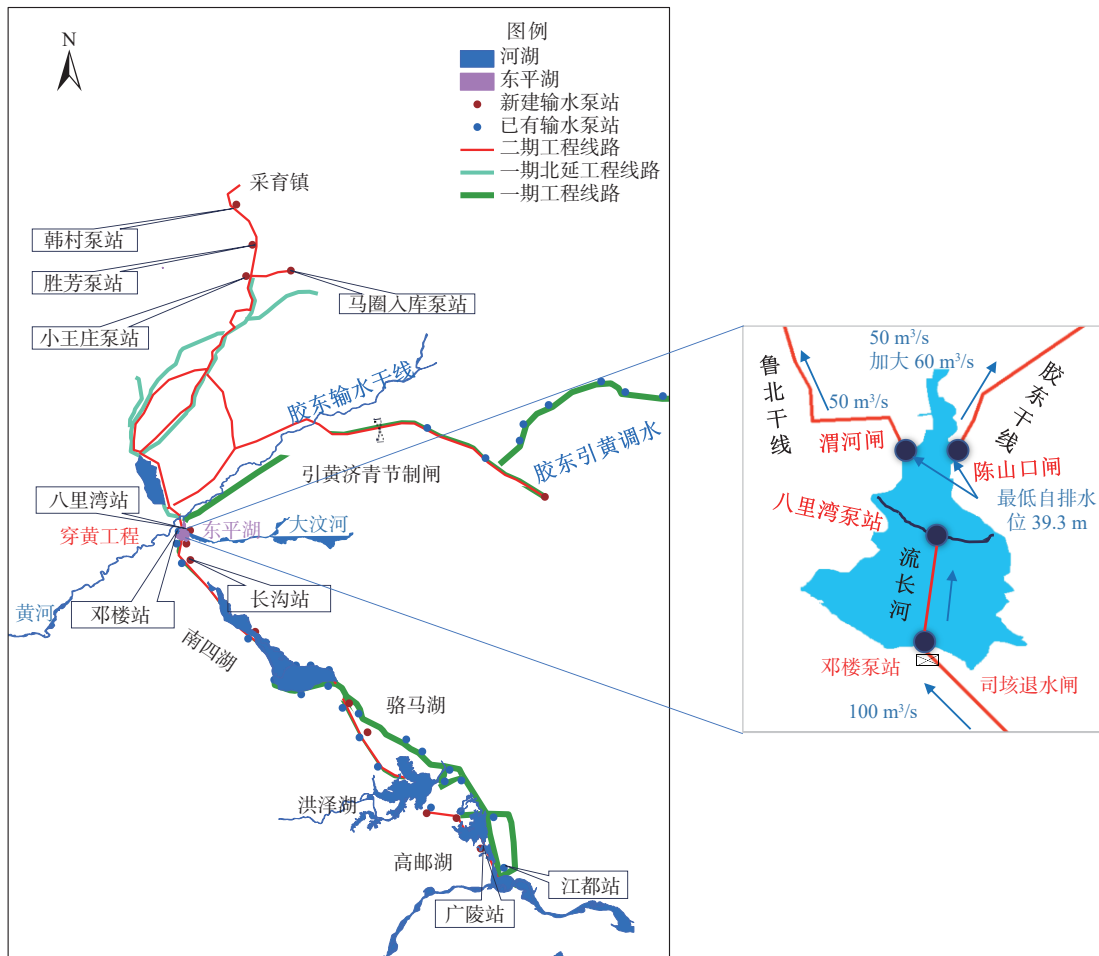


图 1 南水北调东线一期工程入出东平湖线路

Fig. 1 The line of the first phase of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project entering and exiting Dongping Lake

## 1.2 研究的总体思路

为实现东平湖库容效益最大化,增加东线调度灵活性,提出挖掘东平湖富余调蓄库容调节东线来水的调度思路,依照水量平衡和多目标优化原则,

构建河-湖-库-渠多水源调蓄模型,在对比分析不同情境调度方案对湖周用水保证率、东平湖需水量、入黄水量、工程安全的影响后,提出新时期东平湖推荐运行方案。研究的总体思路见图2。

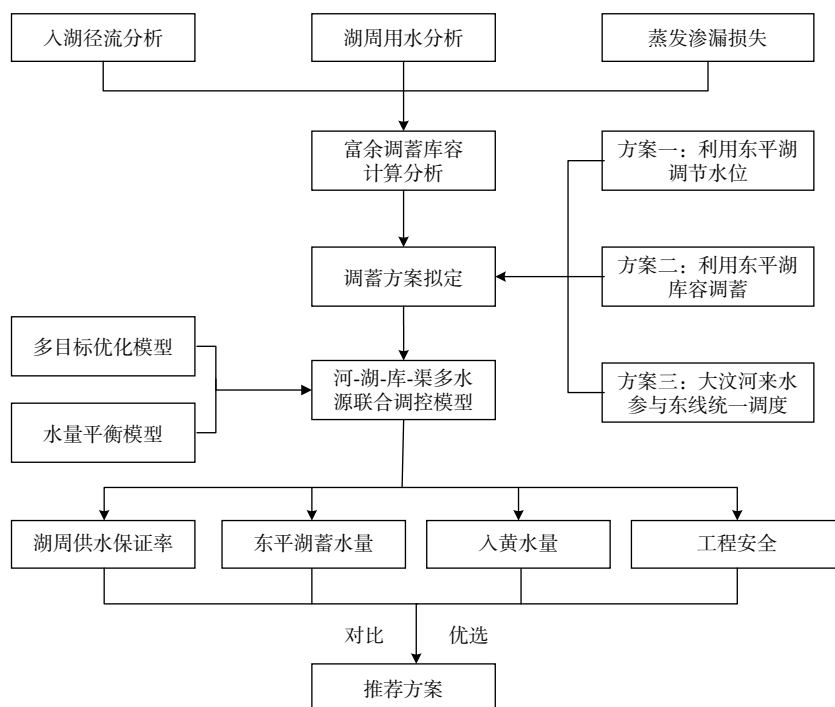


图2 研究的总体思路

Fig. 2 The roadmap of research

## 2 东平湖调蓄东线来水的可行性分析

东平湖兼具滞洪和调蓄双重作用,其对东线来水调蓄作用主要依靠库区富余库容。富余库容是指在保证防洪安全、满足水库供水的前提下东平湖能够用来调蓄的最大库容量。因此可以从东平湖富余库容的分析和量化来讨论东平湖调蓄东线来水的可行性。富余库容的计算是基于水量平衡并依照水库运用原则,通过径流调节得到的,计算公式为

$$W_{\text{富余}} = W_{\text{限制}} - (Q - W)T \quad (1)$$

$$W = W_{\text{蒸发渗漏}} + W_{\text{湖周取水}} + W_{\text{入黄}} \quad (2)$$

式中:  $W_{\text{富余}}$  为富余调蓄库容, 亿  $\text{m}^3$ ;  $W_{\text{限制}}$  为不同水库调度方案(汛限水位)实施下东平湖的库容, 亿  $\text{m}^3$ ;  $Q$  为在  $T$  时段的平均入库流量, 亿  $\text{m}^3$ ;  $W$  为在  $T$  时段的水库取用和消耗的平均流量, 亿  $\text{m}^3$ ;  $T$  为时间段;  $W_{\text{湖周取水}}$  为对应月湖周农业灌溉用水及工业生活用水需水量, 亿  $\text{m}^3$ ;  $W_{\text{蒸发渗漏}}$  为月平均蒸发量和月平均渗漏损失量, 亿  $\text{m}^3$ ;  $W_{\text{入黄}}$  为东平湖入黄水量, 亿  $\text{m}^3$ 。

### 2.1 东平湖入湖水量分析

规划年(2035年)东平湖入湖水量分析计算主要考虑大汶河流域27座大中型水库、干流8座具有特定用户的拦河闸坝的调蓄、供水作用。流域工程网络图详见图3。

根据各水库、拦河闸坝来水量,对沿程各水库、拦河闸坝依次进行兴利调节计算,上游工程弃水、河道生态水量与区间来水相加作为下游工程来水量,逐步计算得到东平湖入湖水量。节点生态水量可根据实际情况,结合最小生态流量考核目标,按天然来水量的5%计算。根据东平湖来水和用水特性,径流调算时段为当年7月初开始至翌年6月末,来水、用水及调节计算时段均以旬计。入库径流计算采用1956年7月—2016年6月共60年大汶河逐旬径流资料,扣除大汶河流域戴村坝以上配置地表水量,推算2035年多年平均入库径流为7.97亿  $\text{m}^3$ ,多年平均天然径流量为13.08亿  $\text{m}^3$ 。

### 2.2 湖周用水量分析

规划水平年东平湖用水户主要为引湖灌区

农业灌溉用水和滨湖水厂取水,年总需引水量为 0.307 亿 m<sup>3</sup>,工业、生活需水量(95%保证率)为 0.811 亿 m<sup>3</sup>,其中,农业灌溉需水量(50%保证率)为 0.504 亿 m<sup>3</sup>。农业和工业、生活引水量过程见表 1。

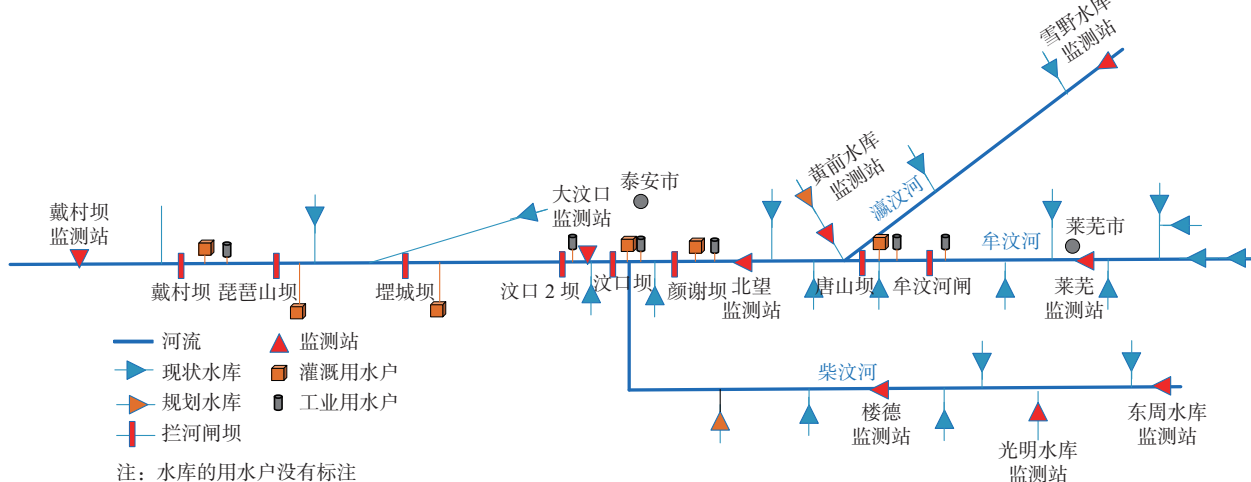


图 3 大汶河流域工程网络

Fig. 3 The engineering network of Dawen River basin

表 1 东平湖湖周需水量月过程分配情况

Tab. 1 Distribution of monthly water demand process in area around Dongping Lake

单位: 亿 m<sup>3</sup>

用户	月份												合计
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
工业、生活(95%保证率)	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.504
农田灌溉(50%保证率)	0	0	0.060	0.067	0.067	0.007	0.015	0.015	0.015	0	0	0.060	0.307
合计	0.042	0.042	0.102	0.109	0.109	0.049	0.057	0.057	0.057	0.042	0.042	0.102	0.811

### 2.3 蒸发、渗漏损失水量

蒸发损失水量。蒸发损失水量是指东平湖水面净蒸发水量,年内随各月气温、湿度、风速等因素而变化。东平湖的蒸发损失水量为

$$W_{\text{蒸发}} = (H - P)A \times 10^{-11} \quad (3)$$

式中:  $W_{\text{蒸发}}$  为水面净蒸发水量, 亿 m<sup>3</sup>;  $H$  为该地月平均蒸发量, mm;  $P$  为月平均降水量, mm;  $A$  为东平湖蓄水水面面积, km<sup>2</sup>。蒸发量和降雨量数据来源于戴村坝站 1956—2016 年实测蒸发、降雨资料。蓄水水面面积计算依据东平湖老湖区水位-库容-面积曲线(2010 年实测成果), 其中 42.72 m 及以下库容、面积不含金山坝以西区域, 见表 2。

渗漏损失水量。东平湖为平原水库, 老湖区已投入使用多年, 运行较为稳定, 因此渗漏损失主要参考东平湖湖区多年平均渗漏损失值, 考虑已建水库运用资料及库区土壤物理指标, 月渗漏损失按月平均蓄水量的 1.2% 估算。

### 2.4 水库调度方案

考虑东平湖的主要任务、功能, 依据 2009 年国务院批复的《全国蓄滞洪区建设与管理规划》、

2015 年国家防总批复的《黄河洪水调度方案》等文件, 结合实际运行情况, 基本选定东平湖运用方式如下:

表 2 东平湖老湖区水位-库容-面积曲线

Tab. 2 Corresponding curve of water level-storage capacity-area in the former lake area of Dongping Lake

水位/m	老湖区	
	库容/亿 m <sup>3</sup>	面积/km <sup>2</sup>
37.72	0.35	69
38.72	1.32	118
39.72	2.63	141
40.72	4.11	155
41.72	5.70	161
42.72	7.32	163
43.22	9.14	205
43.72	10.16	206
44.72	12.28	208

(1) 6—8 月当湖水位超过汛限水位 40.72 m 时, 东平湖泄水入黄;

(2) 9—10 月当湖水位超过汛限水位 41.72 m 时,

东平湖泄水入黄;

(3) 11月—翌年5月当湖水位超过警戒水位41.72 m时,东平湖泄水入黄;

(4) 大汶河来水优先满足当地水资源供水安全和入黄水量要求;当湖水位高于39.3 m时,在满足东平湖生态用水的前提下,优先满足湖周生活、工业用水,尽量满足农业用水。当湖水位低于最低水位39.30 m时,停止湖周供水。

## 2.5 富余调蓄库容计算分析

根据上述径流调节计算参数,在保证防洪安全,满足东平湖湖周生活、工业和农业灌溉用水的前提下,分析计算大汶河不同来水情况下东平湖最大富余调节库容。结果表明,1956年7月—2016年6月月平均富余调节库容1.17亿 $m^3$ ,其中,7—8月0.46亿 $m^3$ ,9—10月1.27亿 $m^3$ ,11月—翌年6月1.33亿 $m^3$ ,见图4。在非汛期大汶河来水相对较少,随着湖周生活、工业和农业灌溉及东平湖自身消耗,富余库容呈现增大趋势。总体而言,在大汶河来水偏枯年份、东平湖水位较低年份利用东平湖富余库容调蓄东线来水是可行的。

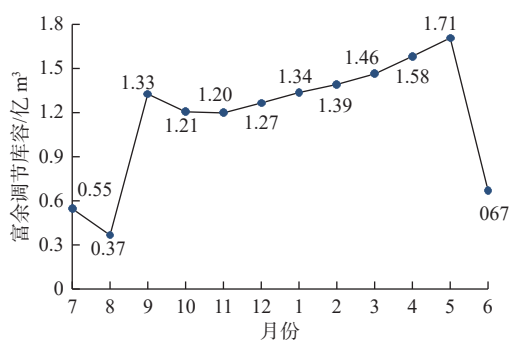


图4 东平湖月平均富余库容

Fig. 4 Monthly average extra available reservoir capacity of Dongping Lake

## 3 东平湖调蓄东线来水方案

### 3.1 河-湖-库-渠多水源联合调度模型构建

为实现不同调度情景下东平湖“进-出-供-耗-排”全过程模拟,分析不同运行规则及入湖方式对东平湖水资源利用带来的影响,构建河-湖-库-渠多水源联合调度模型。主要耦合供需平衡分析、河-湖-库-渠多水源联合调控以及水资源利用多目标优化3个模块。其中:供需平衡分析模块主要针对东平湖来水、供水、输水进行平衡计算,并对全湖域进行水资源供需分析;河-湖-库-渠多水源联合调控模拟的核心问题是妥善处理蓄水与供水的关系及蓄放水次

序,适应水库运行规则变化,提高模拟的灵活性;水资源利用多目标优化,按照水库调度原则和任务,对入出湖的大汶河水、东线来水、黄河干流水进行多水源联合运用,实现水安全保障下水库效益最大化。

### 3.1.1 供需平衡模型构建

根据水量平衡概念,按水库来水、用水、水库的库容条件和运用方式,用时历法进行长系列逐时段(旬)调节计算,分析东平湖可供水量,确定东线二期入湖水量。

$$Q_{\text{东入湖}} = \Delta W_{\text{蓄}} + Q_{\text{胶东}} + Q_{\text{穿黄}} + W_{\text{蒸发渗漏}} + W_{\text{湖周取水}} + W_{\text{入黄}} - W_{\text{汶入湖}} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{东入湖}}$ 为东线二期入湖水量,亿 $m^3$ ; $\Delta W_{\text{蓄}}$ 为根据库水位变化推算的时段内水库蓄变量(增加为正,减少为负),亿 $m^3$ ; $Q_{\text{胶东}}$ 为东线二期山东半岛供水量,亿 $m^3$ ; $Q_{\text{穿黄}}$ 为东线二期调过黄河的水量,亿 $m^3$ ; $W_{\text{蒸发渗漏}}$ 为湖区蒸发渗漏损失量,亿 $m^3$ ; $W_{\text{湖周取水}}$ 为湖周工业、生活和农业灌溉用水量,亿 $m^3$ ; $W_{\text{入黄}}$ 为东平湖经陈山口和清河门闸排泄入黄水量,亿 $m^3$ ; $W_{\text{汶入湖}}$ 为大汶河入湖水量,亿 $m^3$ 。

其中:水文系列、计算时段、东平湖供水对象及供水量、入库径流等与富余库容计算相同;东线二期工程输水时间为9月—翌年6月;二期调水控制水位在保证黄河下游及东平湖自身防洪安全的基础上,结合东平湖目前控制运用指标、实际防洪调度情况、安全建设现状及相关调水方案和文件,考虑东线利用东平湖调蓄的情境,对东平湖控制水位进行调整,将调水控制水位上限由一期的41.30 m调整为41.72 m。

### 3.1.2 多水源联合调度原则

大汶河水、东线来水、黄河水的多水源模型调度规则总体按照6—8月份以防洪为主,9月、10月份在满足防洪的前提下进行兴利调度和东线二期水量调配,11月—翌年5月以兴利运用和东线二期水量调配为主。

(1) 东平湖多水源调度在确保黄河下游和东平湖滞洪区防洪安全、大汶河来水优先满足当地水资源供水安全和入黄水量要求的前提下,确定东线利用东平湖输水控制水位。

(2) 在满足东平湖生态用水的前提下,优先满足湖周生活、工业用水,尽量满足农业用水。

(3) 输水期东平湖湖水位低于39.3 m抽江水补

湖;东平湖湖水位高于 39.3 m 东线入湖平衡,东线引水优先满足胶东和穿黄用户用水。根据穿黄、向山东半岛供水要求以及入湖水量损失等确定抽水入湖流量。

(4)6 月东平湖湖水位高于 40.72 m 以上,9 月一翌年 5 月东平湖湖水位高于 41.72 m 以上,东平湖弃水,八里湾泵站停止抽水入东平湖。

### 3.1.3 水资源利用多目标优化

基于水库在常规调度规程下遭遇东线来水的情景,在水资源均衡调控的基础上,对其做出优化调整,以期达到最佳调蓄效果。模型约束条件主要包括水资源承载能力约束;工程安全约束即水库库容约束、出(入)库流量约束;河湖最小生态需水约束即大汶河入湖水量约束和东平湖最小生态需水约束。

目标函数  $F$  为

$$F = \max(Z_1) + \min(Z_2) + \max(Z_3) \quad (5)$$

$Z_1$  湖周用水保证率目标:保证率越高越好,正偏差最小化; $Z_2$  多年平均蓄水位目标:非汛期蓄水位较无东线情况下增加越小越好,负偏差最小化; $Z_3$  东平湖调蓄东线水量目标:可调蓄量越大越好,正偏差最小化。

水资源承载能力约束,表达式为

$$W_{EC}(n, t) + W_{SO}(n, t) + W_{EO}(n, t) \leq W(n, t) \quad (6)$$

式中: $W_{EC}(n, t)$ 、 $W_{SO}(n, t)$ 、 $W_{EO}(n, t)$  分别为第  $n$  个计

算单元第  $t$  时段生产、生活、河道外生态的供水量,亿  $m^3$ ;  $W(n, t)$  为该计算单元地表水及地下水资源可利用量,亿  $m^3$ 。

水库库容约束,表达式为

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \quad (7)$$

式中: $V_{\min}$  为水库的死库容,亿  $m^3$ ;  $V_{\max}$  为水库的最大库容,亿  $m^3$ ;  $V(t)$  为水库  $t$  时刻的库容,亿  $m^3$ 。

出(入)库流量约束,表达式为

$$Q_{\min} \leq Q(t) \leq Q_{\max} \quad (8)$$

式中: $Q(t)$  为水库  $t$  时刻的出(入)库流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{\min}$  为最小出(入)库流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{\max}$  为最大出(入)库流量,  $m^3/s$ , 与水库最小需供水量、防洪以及生态要求有关。

河湖最小生态需水约束,表达式为

$$200Q_{E,\min}(k, t) \leq Q_E(k, t) \quad (9)$$

式中: $Q_E(k, t)$ 、 $Q_{E,\min}(k, t)$  分别为戴村坝断面  $t$  时刻河道实际流量、最小流量,  $m^3/s$ ; 最小流量需求根据防断流、生态、水质等要求综合分析确定。

### 3.2 方案拟定

以确保黄河下游和东平湖滞洪区防洪安全、大汶河来水优先满足当地水资源供水安全为原则,充分参考东线一期工程调度方案即利用东平湖老湖调节水位为基准方案,按照东线二期工程是否利用东平湖库容调蓄、是否利用大汶河入湖水量向东线受水区供水等设置 3 种方案,见表 3。

表 3 东线二期利用东平湖调蓄方案拟定

Tab. 3 The scheduling plan formulation using Dongping Lake storage function in the second phase of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project

方案	输水时间	调控水位/m	调度运行方式
方案一	9月—翌年5月	39.30~41.72	(1)39.30 m以下抽江水补湖;
	翌年6月	39.30~40.72	(2)调控水位范围内,即9月—翌年5月在39.30~41.72 m,翌年6月在39.30~40.72 m,东线入湖平衡; (3)超过调控水位上限,为保证防洪安全,东平湖泄水入黄,八里湾泵站停止抽水入东平湖
方案二	9月—翌年5月	39.30~41.72	(1)39.30 m以下抽江水补湖;
	翌年6月	39.30~40.72	(2)调控水位范围内,根据胶东、鲁北供水需求以及东平湖富余调节库容确定抽水入湖流量; (3)超过调控水位上限,东平湖泄水入黄,八里湾泵站停止抽水入东平湖; (4)在保证大汶河入湖水指标与东线水指标互不侵占情况下,东线利用大汶河来水过程、东平湖富余库容,优化入湖流量过程
方案三	9月—翌年5月	39.30~41.72	(1)39.30 m以下抽江水补湖;
	翌年6月	39.30~40.72	(2)调控水位范围内,根据胶东、鲁北供水需求、东平湖调节库容以及大汶河富余水量确定抽水入湖流量; (3)超过调控水位上限,东平湖泄水入黄,八里湾泵站停止抽水入东平湖; (4)大汶河来水参与东线的统一调度,充分利用大汶河汛期来水多的特点,在9月、10月优先利用大汶河来水,适当减少东线调水量,在非汛期根据东平湖蓄水情况东线择机增加东线引水规模,全年大汶河水指标和东线水指标总量互不侵占

方案一(基准方案):利用东平湖调节水位方案,调度原则与东线一期相似;

方案二:利用东平湖库容调蓄方案,根据大汶河来水过程和东平湖富余调蓄库容优化东线入湖流

量过程,不占用大汶河水指标;

方案三:大汶河来水参与东线统一调度方案,在9月、10月优先利用大汶河来水,减少东线入湖水量,在非汛期根据东平湖蓄水情况择机增加东线引水规模,全年大汶河水指标和东线水指标总量互不侵占。

### 3.3 方案对比分析

3种方案中,方案二和方案三充分利用东平湖富余库容进行调蓄,最大增加可调蓄库容3.62亿 $m^3$ (在最低运行水位39.30 m至警戒水位41.72 m之间的可利用库容为3.62亿 $m^3$ )。相较于基准方案,增加多水源调度的灵活性,并提升应对极端水文事件的韧性。此外针对湖周用水保证率、东平湖蓄水位、可调蓄库容、入黄水量、工程安全等指标(表4),对比分析3种方案实施后不同的影响。

表4 3种方案水位、蓄水量和入黄水量对比

Tab. 4 Comparison table of parameters after implementation of different schemes contains water level, water storage and yellow volume

方案	方案一	方案二	方案三	
水位/m	7—8月	40.47	40.47	40.61
	9—10月	40.90	41.07	39.80
	11月—翌年6月	40.88	40.91	40.48
	全年	40.81	40.86	40.39
蓄水量/万 $m^3$	7—8月	37 471	37 475	39 656
	9—10月	44 125	46 872	27 836
	11月—翌年6月	43 903	44 358	37 908
	全年	42 868	43 630	36 521
入黄水量/万 $m^3$	7—8月	41 705	41 710	48 871
	9—10月	9 584	9 586	2 484
	11月—翌年6月	8 119	8 137	8 788
	全年	59 408	59 432	60 143

供水保证率:方案一和方案二生活、工业旬供水保证率均为97.64%,农业灌溉旬供水保证率均为97.29%,方案三生活、工业旬供水保证率为98.01%,农业灌溉旬供水保证率为97.36%,均可以满足工业生活供水保证率95%、农业灌溉供水保证率50%的要求。

多年平均蓄水位:方案二部分月份利用东平湖富余库容提前存蓄东线来水,整体湖水位略高于方案一。方案三由于9月、10月利用大汶河水补给东线,因此,9月、10月整体湖水位较方案一和方案二下降约1 m,多年平均蓄水位40.39 m,其中11月—翌年6月水位降低至40.48 m。方案二、三允许东

线利用东平湖库容调蓄方案,9月—翌年5月调蓄水位上限按41.72 m控制,翌年6月按40.72 m控制。由于老湖防洪运用存在泄水入黄不畅问题,东线利用东平湖调蓄占用老湖库容,抬高湖水位,在实际运行中将增加东平湖防汛管理压力。

多年平均入黄水量:方案一多年平均入黄5.94亿 $m^3$ ,主要集中在7—10月,约占全年入黄量的86.3%,方案二与方案一入黄水量与入黄过程基本一致。方案三入黄水量较方案一和方案二略增,多年平均入黄量6.01亿 $m^3$ ,主要集中在7和8月,约占全年入黄量的81.3%,由于输水期大汶河水参与东线统一调度,因此输水期入黄水量较方案一和方案二更为均匀。虽然该方案大汶河水指标和东线水指标总量互不干扰,但汛期入黄水量减少,非汛期入黄水量增加,将改变东平湖的年入黄水量过程,进而影响山东省黄河下游水资源配置和黄河入海过程。

工程安全:方案二、三东线补水入湖水位按39.30 m控制,利用39.30~41.72 m(9月—翌年5月)/40.72 m(翌年6月)之间库容调蓄,允许东线利用老湖蓄水,从调算结果看,此类方案将增加老湖高水位运用概率和历时,对沿湖堤防工程石护坡的破坏性增强。二级湖堤、金山坝、昆山堤和山赵堤高水位运行时存在渗漏问题;金山坝、昆山堤和山赵堤三段堤防上分布的灌溉闸运行已有40余年,工程标准低、老化失修严重,二级湖堤上分布的刘口、辘轳吊闸经2015年安全鉴定为三类闸,存在安全隐患。初步分析方案二、三可能影响上述工程安全运行。

### 3.4 东线二期利用东平湖调蓄方案推荐

对比3种方案模拟结果可发现:

方案三供水保障率最高,但调度方案对东平湖的年入黄水量过程改变较大,直接影响山东省黄河下游水资源配置和黄河入海过程。大汶河来水极不稳定,水量预报难度大,汛期使用大汶河水在实际调度过程中操作复杂、难度大,对水量监测和预报提出较高要求。实际管理操作的过程涉及多家水管单位,汛期先引用大汶河水,还涉及水价等诸多问题,多方利益难以协调。

方案二实施后周边生活、工业旬供水保证率为97.64%,农业灌溉旬供水保证率为97.29%,较基准方案并未下降,不改变入黄过程,部分月份利用东平湖富余库容提前存蓄东线来水,整体湖水位略高于基准方案,入湖总量较基准方案基本一致,入湖

过程更为均匀有利于东线总体水量调配。总体而言,方案二虽然使用东平湖进行调蓄,但对当地供水保障无影响,入黄过程更加均匀化,此外增加了东线调蓄库容 3.62 亿  $\text{m}^3$ ,可提高调度灵活性,提升极端事件影响下水资源系统韧性。东线二期规划多年平均出湖水量为 72.88 亿  $\text{m}^3$ ,通过调整东平湖运行管理方案,对东线设计输水规模调控能力增强约 4.96%,并且东线二期运行过程中不会马上达到设计调水规模,是一个缓慢增大的过程,东平湖的调蓄库容在前期作用将更加显著。此外,东线一期实际运行过程并未严格按照原调度方案运行,也尝试使用富余库容进行调蓄,取得了良好的效果。东线一期实践经验证明,方案实施后带来的不利影响可通过一定的工程措施解决,其负面影响总体可控。

因此推荐采用方案二作为东线二期利用东平湖调蓄方案。推荐方案具体如下:

输水时间及水位:输水时间为 9 月—翌年 6 月,其中 9 月—翌年 5 月调蓄水位为 39.30~41.72 m;翌年 6 月调蓄水位为 39.30~40.72 m。

调度运行方式:(1)东平湖老湖区水位低于 39.30 m 且有调水要求时,八里湾泵站抽水补充东平湖老湖区,补水水位按 39.30 m 控制。(2)9 月、10 月份,东平湖老湖区水位在 39.30~41.72 m 时,视黄河、大汶河雨水情,按山东半岛、鲁北段调水要求及东平湖蓄水情况确定抽水入湖水量,严格控制水位不超汛限水位;11 月—翌年 5 月,东平湖老湖区水位在 39.30~41.72 m 时,按山东半岛、鲁北段调水要求及东平湖蓄水情况确定抽水入湖水量;翌年 6 月,东平湖老湖区水位在 39.30~40.72 m 时,按山东半岛、鲁北段调水要求及东平湖蓄水情况确定抽水入湖水量。(3)东平湖老湖区水位高于 41.72 m(9 月—翌年 5 月)/40.72 m(翌年 6 月)或黄河花园口站流量大于 10 000  $\text{m}^3/\text{s}$  时,八里湾泵站停止抽水入东平湖。(4)东线入东平湖水量需考虑湖区的蒸发渗漏损失,东线分摊水量按东平湖输水期总蒸发渗漏量的 40% 计。

## 4 结论

通过定量分析利用东平湖调节水位、利用东平湖库容调蓄、大汶河来水参与东线统一调度 3 个方案的实施效果,统筹考虑水资源利用多目标

优化,推荐提出东平湖库容调蓄方案。该方案允许东线利用老湖 39.30~41.72 m(9 月—翌年 5 月)/40.72 m(翌年 6 月)之间库容调蓄,不占用大汶河水指标。推荐方案最大可增加东线调蓄库容 3.62 亿  $\text{m}^3$ ,占东线二期出湖水量的 4.96%,提升东平湖水库作为调水节点的调控能力,与东线调水线路上起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖共同组成东线水资源调控体系,提升东线工程水安全保障和韧性,充分发挥东线效益。

值得注意的是推荐方案可能对东平湖工程安全产生不利影响,主要包括:湖水位最低抬高 0.20 m,对沿湖堤防工程石护坡的破坏性增强,增大东平湖防汛管理压力;可能影响老湖二级湖堤等工程安全运行、增加老湖环湖路以内耕地淹没面积和频次。可结合以往实践经验,通过工程和管理措施对不利影响进行消除或降低。

## 参考文献:

- [1] 盛金保,李宏恩,盛韬桢.我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J].水利水运工程学报,2023(1):1-15. DOI: 10.12170/20220919001.
- [2] 康亚静,刘宇,解家毕.超标准暴雨洪水条件下南水北调中线工程沿线各单元风险评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(2):342-351. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0035.
- [3] 冯志勇,李立群,吴永妍,等.南水北调中线一期工程总干渠输水损失变化规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):600-609. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0061.
- [4] 杜霞,耿雷华.南水北调中线工程运行风险分析[J].水利水电技术,2011,42(3):85-88. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.03.024.
- [5] 靖淑慧,刘加珍,陈永金,等.氢氧稳定同位素对东平湖枯水期水环境的指示作用[J].南水北调与水利科技(中英文),2019,17(1):120-129,149. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0017.
- [6] 栗文佳,陈影影,于世永,等.近40年来东平湖水环境变迁及驱动因素[J].环境工程,2018,36(10):48-52. DOI: 10.13205/j.hjgc.201810010.
- [7] 潘健,于丹丹,何振芳,等.东平湖湿地景观演变对人类活动的响应机制[J].水资源保护,2017,33(4):88-94. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.04.014.
- [8] 程珊珊,姚丽.东平湖蓄滞洪区移民经济可持续发展的思考[J].中国水利,2020(12):10-12.
- [9] 韩非,陈影影,于世永,等.1954—2018年东平湖水位变化特征及驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):102-109. DOI: 10.11705/j.issn.1672-



- 643X.2020.03.15.
- [10] 孟建成, 宋霞. 南水北调东线东平湖区发展新型文化业态的思考[J]. 中国水利, 2019(16): 30-31.
- [11] 于晓龙, 徐洪增, 刘新阳, 等. 东平湖生态水位和生态系统健康研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.11.012.
- [12] 郭亚梅, 任东红. 南水北调东线背景下东平湖综合效益的发挥[J]. 人民黄河, 2012, 34(11): 23-25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2012.11.008.
- [13] 江恩惠, 李军华, 董其华. 东平湖水库未来战略地位探讨[J]. 中国水利, 2009(23): 7-11.
- [14] 李薇, 谢国虎, 胡鹏, 等. 黄河洪水洪峰增值机理及影响因素研究[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1111-1122. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190103.
- [15] 蔡蓉蓉, 张红武, 卜海磊, 等. 黄河下游洪水频率分析研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.03.004.
- [16] 王如岩, 张春霞, 程家兴. 大汶河流域近60年降水与水资源演变趋势分析[J]. 地下水, 2022, 44(4): 204-206. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2022-04-069.
- [17] 侯世文. 大汶河洪水资源化开发利用浅析[J]. 地下水, 2010, 32(3): 135-136. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2010.03.055.
- [18] 姜志伟, 王永刚. 东平湖与黄河连通应急水源工程建设必要性探讨[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 52-53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.S2.021.
- [19] 胡春宏. 黄河水沙变化与下游河道改造[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 10-15. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.06.002.
- [20] 武彩萍, 李远发, 陈俊杰, 等. 新时期东平湖水库综合运用有关问题讨论[J]. 人民黄河, 2008, 30(9): 13-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2008.09.007.
- [21] 梁云, 殷峻暹, 张丽丽, 等. 东平湖老湖调整为综合利用水库的可行性: 南水北调东线通水后[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 18-20, 101. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.04018.
- [22] 格菁, 格艳. 浅论东平湖洪水资源化与水资源可持续发展[J]. 人民黄河, 2020, 42(S1): 30-35. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.S1.013.
- [23] 梁霄, 巨文慧, 孙博闻, 等. 基于关键闸坝优选的区域水网水量调控[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1238-1248, 10.134. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0126.
- [24] 戴晶晶, 陈红, 彭焱梅, 等. 太浦闸水量水质联合调度对金泽水库水质影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 20-27. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2017.04.004.
- [25] 徐宗学, 庞博, 冷罗生. 河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 757-764. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0077.

## Feasibility on the use of Dongping Lake for the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project

WANG Linwei<sup>1,2</sup>, SU Liu<sup>1,2</sup>, TAN Peiyang<sup>1,2,3</sup>, MING Guanghui<sup>1,2</sup>

(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), Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China; 3. Postdoctoral Research Station of Hydraulic Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Global climate change and human activities, have led to a significant rise in the occurrence and intensity of extreme hydrological events in the basin. To deal with this situation and ensure the security of the country's water supply, the national water network project was proposed. The South-to-North Water Transfers Project served as the primary framework to achieve this objective. Since the implementation of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project, water security has been significantly improved. However, Dongping Lake, as an important node reservoir and the last stage of regulation reservoir of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project, was underutilized for a comprehensive reservoir.

To enhance the water supply benefit of the second phase of the Eastern Route and the resilience of the water resources system to extreme events, a new scheme was proposed by the surplus storage capacity of Dongping Lake to regulate water inflow into the lake. First, the concept of surplus storage capacity was defined, and the value of surplus storage capacity and variation were analysed according to the parameters of discharge into the lake, water consumption around the lake and the evapotranspiration loss of Dongping Lake Reservoir. Second, based on the principle of reservoir water balance, sequential logic of multi-source joint dispatching decision and multi-objective optimisation, different regulation schemes of Dongping Lake were proposed for the second phase of the South-to-

North Water Transfers Project. The optimal storage scheme of Dongping Lake was recommended by comparing the application effects of different implementation schemes according to the influence of the guarantee rate of water consumption around the lake, the water demand of Dongping Lake, the water inflow into Yellow Lake and the safety of engineering. The optimal storage scheme could provide a concrete reference for the actual operation and management of the Dongping Lake Reservoir.

The results show that: the average monthly surplus storage capacity of Dongping Lake from 1956 to 2016 was 117 million  $\text{m}^3$ . It is feasible to use the surplus storage capacity of Dongping Lake to transfer and store the incoming water from the Eastern Route when the incoming water from Dawen River is dry and the water level of Dongping Lake is low. The scheme to regulate the storage capacity of Dongping Lake was recommended by analysing the effects of different schemes on the guarantee rate of water consumption around the lake, the water demand of Dongping Lake, the water inflow into Yellow River and the safety of engineering. Although the scheme has little effect on reducing the amount of water transferred from the Eastern Route, it increased the storage capacity of the Eastern Route by 362 million  $\text{m}^3$ .

The scheme of Dongping Lake needs to be adjusted in order to adapt to the changes in the external environment and to realise the comprehensive functions in the new time period. The scheme of Dongping Lake storage capacity regulation could make full use of the storage capacity of Dongping Lake and increase the flexibility of Dongping Lake reservoir dispatch. At the same time, this regulation scheme improves the resilience of the reservoir to extreme hydrological events. This is of great significance in enhancing the benefits of comprehensive reservoir utilisation and ensuring the water security in the basin.

**Key words:** surplus storage capacity; scheduling rule; benefit of comprehensive utilization; Dongping Lake; South-to-North Water Transfers Project



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部