

许继军, 张晓琦, 周涛, 等. 引江补汉工程实施后的南水北调中线水源工程可调水量分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 790-799. XU J J, ZHANG X Q, ZHOU T, et al. Analysis on the adjustable water volume of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project after the implementation of the water diversion from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 790-799. (in Chinese)

引江补汉工程实施后的 南水北调中线水源工程可调水量分析

许继军^{1,2}, 张晓琦^{1,2}, 周涛^{1,2}, 李清清^{1,2}, 尹正杰^{1,2}, 王永强^{1,2}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010)

摘要:随着新时期南水北调后续工程的高质量发展, 首批建设工程引江补汉工程正式开工, 为支撑未来南水北调中线水源工程与引江补汉工程的联合协调运行, 根据引江补汉工程设计参数, 提出多组丹江口水库与引江补汉工程联合调度方式, 并模拟分析得到引江补汉工程实施后南水北调中线水源工程可调水量具有重要意义。研究结果表明: 设置引江补汉工程补水水位控制线、同步优化陶岔渠首引水调度线, 充分利用引江补汉工程补水来满足汉江中下游用水需求, 从而置换更多坝前水量引至陶岔渠首、清泉沟等用水需求方, 可在一定程度上实现丹江口水库供水与引江补汉工程补水决策的有效衔接; 相比于中线一期工程现状供水调度情景, 采用合适的引江补汉工程与中线水源工程联合调度方式, 可在保障汉江中下游用水量需求的同时, 满足下游断面最小用水量达标率至 98.9%~99.2%, 并提高中线受水区可供水量 17.7 亿~25.8 亿 m³, 继而有效协调中线水源工程的中线受水区、清泉沟渠首及汉江中下游等多方用水需求。

关键词:可调水量; 引江补汉工程; 南水北调中线工程; 供水保障; 引水流量

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0077

南水北调中线(以下简称中线)一期工程自 2014 年 12 月通水, 截至 2022 年 12 月 12 日已通过陶岔渠首累计调水入渠水量超 530 亿 m³, 直接受益人口达 8 500 多万人, 显著改善了受水区的水资源条件和供水保障程度^[1-3], 促进了水源区汉江上游生态修复^[4-7], 提高了汉江中下游防洪能力, 取得了巨大的经济、社会和生态效益^[8-10]。

中线水源工程的水资源调度问题涉及多方面影响要素, 围绕其开展的学术研究成果丰硕, 如分析丹江口水库的入库径流变化特征、辨识丹江口水库面临的多用水对象之间的竞争协调关系, 分析丹江口水库调度对汉江流域中下游水质影响等。中线水源工程作为一个大规模跨流域调水工程, 针对丹江口水库可调水量的研究意义重大, 在很大程度上关系到国家水网工程的安全运行。孟猛^[11]采用

SWAT 模型模拟了多种气候模式下的丹江口水库入库径流, 并假拟不同调度情景推演了不同气候变化影响下的中线水源工程可调水量; Men 等^[12]推导了考虑下泄流量限制和风险对冲规则的丹江口水库供水优化调度图, 年均北调水量分别增加了 1.2 亿 m³ 和 2.6 亿 m³; 马嘉悦^[13]提出了基于等流量调节的丹江口水库供水调度规则, 并模拟计算了丹江口水库多年平均可调水量, 推演的调水过程年内年际分配较现状调度规则更为均匀。

近年来, 面对新时期国家发展战略需求, 中线工程水资源调配的供需两侧都发生了变化^[14-16]: 一是随着京津冀协同发展和雄安新区建设^[17], 中线工程供水对象和范围不断扩大与调整, 且北调水已经成为京津冀沿线大中城市地区的主力水源, 当前的供水局势变化给中线北调水量和供水保障能力提出

收稿日期: 2023-01-12 修回日期: 2023-06-16 网络出版时间: 2023-08-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230807.1628.004>

基金项目: 2021 水利部重大科技项目(SKR-2022006)

作者简介: 许继军(1971—), 男, 湖北武汉人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源、水资源管理等方面研究。E-mail: xujj07@163.com

通信作者: 张晓琦(1993—), 女, 湖北武汉人, 工程师, 博士, 主要从事水资源规划、水库调度与水资源配置等方面研究。E-mail: zhangxq@mail.crsri.cn

了新的调水需求^[18];二是汉江流域自身经济社会发展用水需求增加^[19-20],同时还需考虑与汉江流域规划建设或已运行的跨流域跨地区调水工程之间的协调;三是新时期背景下的国家战略规划对中线工程水源区和受水区的生态环境保护提出了更高的要求^[21-24]。因此,新时期中线工程水源区水资源供给将面临巨大的压力。2012年国务院批复的《长江流域综合规划(2012—2030年)》^[25]考虑中线工程再从汉江增加调水量,要求“根据汉江流域经济社会发展状况及水资源利用程度,尽快启动从长江干流引水补充汉江的研究,并相继实施”,即引江补汉工程。

2022年7月7日,引江补汉工程宣布开工,该工程的实施运行将影响中线水源工程的现状水资源格局,探究其如何与丹江口水库调度运行实现有效衔接是亟须开展的研究课题。因此,本文旨在结合引江补汉工程规划设计参数,模拟探究引江补汉

工程实施后中线水源工程向中线受水区的可调水量,为未来引江补汉工程建成后中线水源工程引调水方式的调整提供技术支撑。

1 中线工程及引江补汉工程概况

1.1 中线水源工程引调水规则

中线水源工程丹江口水利枢纽总库容为339.1亿 m^3 ,正常蓄水位170m,极限死水位145m,丹江口水库以防洪和供水功能为主,兼顾发电和航运功能,具有多年调节能力。通过优化调度可满足一期工程向北方调水95亿 m^3 的要求,同时使汉江中下游的防洪能力由目前的20年一遇提高到近100年一遇。陶岔枢纽是丹江口水库的副坝,也是中线输水工程的渠首,设计流量350 m^3/s ,加大流量420 m^3/s 。丹江口水库遵循的供水调度图见图1。

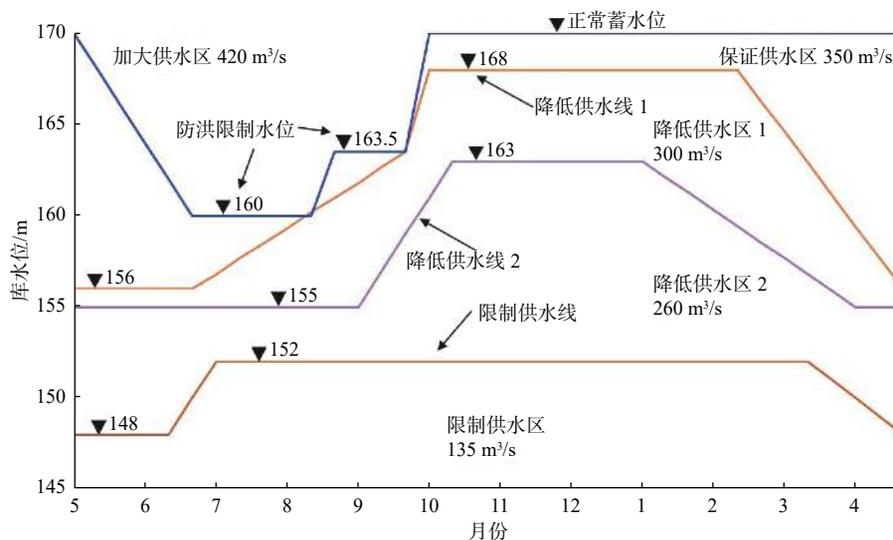


图1 丹江口水库供水调度图

Fig. 1 Water supply operating curves of Danjiangkou Reservoir

1.2 中线水源工程引调水规则

引江补汉工程是中线工程的后续水源,从长江三峡库区引水入汉江,提高汉江流域的水资源调配能力,增加中线工程的北调水量,提升中线工程的供水保障能力,并为引汉济渭工程达到远期调水规模及向工程输水线路沿线地区城乡生活和工业补水创造条件^[26-27]。引江补汉工程的引水参数参考长江水利委员会的《引江补汉工程可行性研究报告(2021)》^[26],即推荐引江补汉工程从三峡库区的龙潭溪自流引水至丹江口水库坝下的汉江干流,多年平均引江水量39.0亿 m^3 ,其中:向中线陶岔渠首多年平均补水24.9亿 m^3 ,补水后多年平均北调水量115.1亿 m^3 ;

向汉江中下游补水6.1亿 m^3 ,并具备利用工程空闲时段应急补水的潜力;补充引汉济渭工程按远期规模引水后丹江口水库入库径流减少量5.0亿 m^3 ;向输水工程沿线补水约3.0亿 m^3 。引江补汉工程输水总干线设计引水流量170 m^3/s ,最大引水流量212 m^3/s 。

2 考虑引江补汉工程实施后的丹江口水库优化调度模型

丹江口水库现状供水调度图指导了陶岔渠首和清泉沟的年内引水流量决策,本文旨在在现状供水调度图的基础上增设水库坝前引江控制线,构建考虑引江补汉工程实施后的丹江口水库优化调度模

型,挖掘丹江口水库可调水量的潜力,从而实现丹江口水库与引江补汉工程的联合运行。模型结构如下。

2.1 目标函数

南水北调中线工程陶岔渠首多年平均可调水量最大,表达式为

$$\max \bar{S}_{tc} = \frac{1}{N} \sum_{y=1}^N S_{d(y)} \quad (1)$$

式中: \bar{S}_{tc} 为陶岔渠首多年平均可调水量, 亿 m^3 ; N 为模拟调度的序列长度, 年; $S_{d(y)} = \sum_{t=1}^T Q_{d(t)} \cdot \Delta t$ 为陶岔渠首第 y 年可调水量 ($y = 1, 2, \dots, N$), 亿 m^3 。

2.2 约束条件

与现状丹江口水库调度规则相比, 纳入引江水的补水作用之后尽量不额外增加丹江口水库弃水

$$\bar{S}_q \leq \bar{S}_{q,0} \quad (2)$$

式中: \bar{S}_q 为丹江口水库优化调度后的多年平均弃水量, 亿 m^3 ; $\bar{S}_{q,0}$ 为丹江口水库现状多年平均弃水量, 亿 m^3 。

汉江中下游黄家港断面最小下泄流量约束

$$Q_{out} \geq Q_{min} \quad (3)$$

式中: Q_{out} 为丹江口水库出库流量, m^3/s ; Q_{min} 为汉江中下游黄家港断面需求的最小下泄流量, m^3/s , 一般取 $490 m^3/s$, 当丹江口水库库水位低于 $150 m$ 且来水小于 $350 m^3/s$ 时, 需求的最小下泄流量 Q_{min} 按 $400 m^3/s$ 控制。

中线陶岔渠首引水流量约束

$$0 \leq Y_{tc} \leq Y_{tc,max} \quad (4)$$

式中: $Y_{tc,max}$ 为陶岔渠首引水最大流量, 取值 $420 m^3/s$; Y_{tc} 为陶岔渠首调度过程实际引水流量, m^3/s , 需结合丹江口水库供水调度图作出决策。

水库调度其他常规约束条件(水量平衡约束、水库水位约束、水库下泄流量约束、下泄流量尾水位关系约束、水电站水头约束、水电站出力约束、调度线曲线的形状约束、非负约束)^[28], 不赘述。

2.3 优化变量及模型求解

考虑到模型的多变量求解维度, 选取优化变量如下:

引江补汉工程补水水位控制线 1 条, 在控制线上选取 3 个拐点坐标、1 个端点, 共计 7 个变量, 且在补水控制线以下引江补汉工程启动补水, 反之在补水控制线及以上则停止补水。

陶岔渠首引水调度规则线 3 条(限制供水线、

降低供水线和保证供水线), 每条线选取 3 个拐点、1 个端点, 共计 21 个变量。

3 条陶岔渠首引水调度规则线与水库调度水位上下边界线形成 4 个引水决策区间(从上向下依次为: 保证供水线与水库调度水位上边界线构成的区域为加大供水区; 保证供水线与降低供水线之间构成的区域为保证供水区; 降低供水线与限制供水线之间构成的区域为降低供水区; 限制供水线与水库调度水位下边界线构成的区域为限制供水区)。每个引水决策区间对应一个引水流量设计值, 其中, 加大供水区和保证供水区分别采用陶岔渠首加大引水流量 $420 m^3/s$ 、设计引水流量 $350 m^3/s$ 引水, 降低供水区和限制供水区引水流量值选取优化变量, 共计 2 个变量。

优化模型综合变量个数及运算速率因素采用布谷鸟搜索优化算法进行求解, 该算法寻优机制源自布谷鸟的寄生育雏行为以及莱维飞行特征^[29], 由于步长长短相间从而更容易跳出局部最优解, 适用于本文所构建的多维变量优化模型的求解。

3 调度模拟情景设置

3.1 模拟方案设置

基于中线水源工程现状供水情况、未来规划水平年(2035 年)供水需求, 应用构建的考虑引江补汉工程实施后的丹江口水库优化调度模型(方案 3)推求丹江口水库可供水量, 并以丹江口水库现状供水调度情景(方案 1)为基准对照方案。此外, 为了探究分析本文所提出的丹江口水库优化调度方案对水资源配置的合理性, 根据引江补汉工程不同补水功能定位、与丹江口水库不同的衔接运行方式另增设两组模拟情景(方案 2 和方案 4), 共计 4 组模拟方案:

方案 1 丹江口水库现状常规供水调度情景;

方案 2 考虑引江补汉工程实施后, 丹江口水库下泄流量不满足下游用水需求时段, 引江补汉程相机补水;

方案 3 考虑引江补汉工程实施后, 设置水库坝前引江控制线, 同步优化丹江口水库供水与引江补汉工程补水规则;

方案 4 考虑引江补汉工程实施后, 若充分挖掘引江补汉工程引水能力, 设定引江补汉工程常年向汉江中下游补水。

方案 1 为基准方案, 模拟现状中线水源工程调

度情景;方案2~方案4为考虑引江补汉工程实施后,根据引江补汉工程与丹江口水库联合调度的方式不同进行设置,分别估算中线水源工程可供水量,其中方案3对应于本文所构建的考虑引江补汉工程实施后的丹江口水库优化调度模型。与方案1相比,方案2~方案4的设置目的是对比研究引江补汉工程实施后对中线水源工程可供水量的增益情况分析,而方案2~方案4这3个方案之间设置的目的是探究丹江口水库与引江补汉工程以何种联合调度方式进行水工程衔接,可实现引江补汉工程补水量与可增加的中线水源工程可供水量之间的高效置换,并通过方案对比验证所构建的丹江口水库优化调度模型的合理性。

3.2 模拟水平年和典型年情景

聚焦2035水平年引江补汉工程实施以后中线工程可供水量(即经陶盆渠首北调水量)研究,具体以中线水源工程丹江口水库为研究主体,重点考虑中线工程陶盆渠首引水、清泉沟引水、引江补汉工程引水,研究区域从丹江口水库入库断面至下游黄家港断面(距离坝址约5.1 km),将其他引调水工程与灌区用水视为边界条件或不纳入考虑,系统概化图见图2。需要说明的是,丹江口水库上游梯级水库及引调水工程的影响均已反映在水库来水资料中,不单独考虑;丹江口水库对下游黄家港断面以下引调水工程或梯级水库调度的影响分析不在本文研究范围内。此外,采用的水库入库径流资料及涉及的多方需水量边界条件与长江水利委员会《引江补汉工程可行性研究报告(2021)》^[23]一致。丹江口水库入库采用1956—2018年长系列径流资料,入库多年平均径流量约374亿 m^3 。

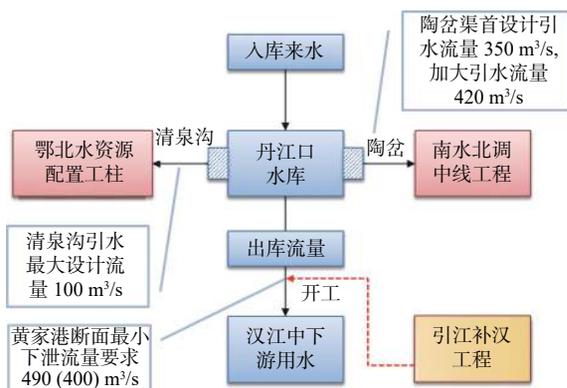


图2 系统概化

Fig. 2 System overview diagram

中线水源工程概化考虑的多方需水量:汉江中下游黄家港断面河道内外年需水总量为163.8亿 m^3 ;

清泉沟渠首引水需求按13.98亿 m^3 。

在来水频率方面,依次根据丹江口水库来水设计频率丰平枯等级划分,模拟计算选择丰、平、枯和特枯4种典型入库径流情景,与供水调度年度一致(11月—次年10月)进行模拟过程展示。长序列情景与引江补汉工程可研计算时段保持一致(1956年5月—2018年4月),并开展模拟统计指标对比:

丰水年(1983年11月—1984年10月),对应来水频率 $P=4.8%$;

平水年(1987年11月—1988年10月),对应来水频率 $P=52.4%$;

枯水年(2007年11月—2008年10月),对应来水频率 $P=73.0%$;

特枯水年(1998年11月—1999年10月),对应来水频率 $P=94.7%$ 。

长序列多年平均情景(1956—2018年长系列)。

4 各方案计算结果及对比分析

4.1 方案1模拟计算结果

方案1对应丹江口水库现状供水调度方案,长序列多年平均情景的计算指标结果见表1。由表1可以看出:陶盆渠首可供水量为90.2亿 m^3 ,清泉沟渠首可引水量为13.8亿 m^3 ,水库弃水量61.7亿 m^3 ,下游断面最小下泄流量达标率为98.4%。选取丰、平、枯、特枯4种典型来水情景开展模拟计算,水库出入库调度过程见图3。由图3可以看出:加高后的丹江口水库由不完全年调节水库变为多年调节水库,调节库容增加了116亿 m^3 ,其削峰补枯的调蓄作用相当显著;从水库出库流量过程角度分析,丹江口水库在所选的丰、平和枯3种典型情景下基本能满足下游断面最小下泄流量要求。方案1中陶盆渠首可调水量年内过程见图4,陶盆渠首可调水量在丰水年和平水年情景下的年内过程与多年平均年内过程变化趋势基本一致,而特枯水年由于来水较少,在3—10月的陶盆渠首可调水量均偏少,远低于多年平均值。

4.2 方案2模拟计算结果

在方案1的基础上,方案2构建的思路是在水库调度过程考虑引江补汉工程对下游相机补水作用,具体而言,当丹江口水库下泄流量决策不满足下游最小下泄流量490 m^3/s 时,启用引江补汉工程补水。丰、平、枯、特枯4种典型来水情景模拟计算结果基本与方案1一致,不详细展示。方案2推

求的长序列多年平均情景的计算指标结果见表 1。与方案 1 相比,方案 2 陶盆渠首可水量、清泉沟可引水量、水库弃水量和发电量指标均持平,即若引江补汉工程对坝下相机补水并不会对水库坝前

引调水工程引水以及水库自身调度决策产生影响,但对汉江中下游黄家港断面最小下泄流量达标率及下泄水量会有所提升。

表 1 方案 1~方案 4 计算结果对比(长系列多年平均)
Tab. 1 Comparison of calculation results of Scheme 1-4 (long-series multi-year average)

方案序号	陶盆渠首可供水量/亿m ³	丹江口水库下泄水量/亿m ³ (不含引江)	清泉沟渠首可引水量/亿m ³	引江补汉补水量/亿m ³ (含置换北调水和补汉江中下游)	水库弃水量/亿m ³	水库发电量/亿(kW·h)	最小下泄流量达标率/%
1	90.2	272.8	13.8		61.7	35.2	98.4
2	90.2	272.9	13.8	1.6	61.7	35.2	100
3	107.9	255.9	13.4	28.8	51.2	33.0	98.9
4	116.0	248.0	13.4	60.4	46.9	32.2	99.2

注:“水库弃水量”指当入库水量超过发电机组所能通过的流量上限未用于发电的这部分水量;“最小下泄流量达标率”指满足汉江中下游黄家港断面最小下泄流量490 m³/s的多年平均满足情况;另,当库水位低于150 m且来水小于350 m³/s时,下泄流量按400 m³/s控制。

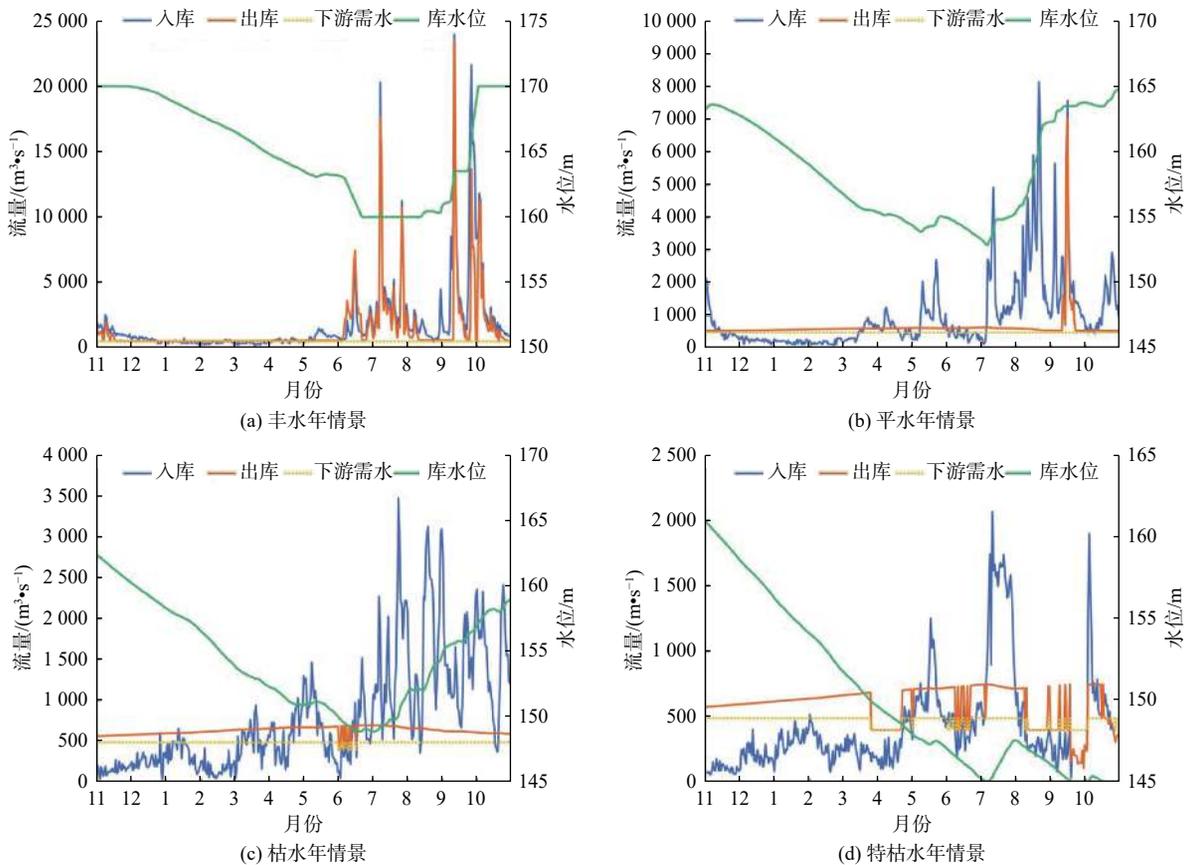


图 3 水库出入库调度过程(方案 1)

Fig. 3 Process diagram of reservoir operation (Scheme 1)

图 5 为方案 2 陶盆渠首可调水量年内过程及引江补汉工程补水量统计情况。由图 5 可发现:引江补汉工程在研究时段长序列范围内共计 17 个调度年进行补水,补水量范围为 0.17 亿~22.34 亿 m³/调度年;

其中,1997—1999 年连续枯水年常年补水 6.48 亿~22.34 亿 m³/调度年,2006—2007 年连续补水 0.54 亿~1.17 亿 m³/调度年。由于方案 2 中引江补汉工程采用相机补水策略,并未对丹江口水库坝前引水调度

决策有实质性影响,故其陶岔渠首可调水量年内过程与方案1基本一致。

4.3 方案3模拟计算结果

方案3是在方案2的基础上设置引江补汉工程

补水水位控制线,并同步优化陶岔渠首引水调度图,旨在构建水库供水调度优化模型衔接丹江口水库坝前引水与引江补汉工程补水决策之间的关联性。

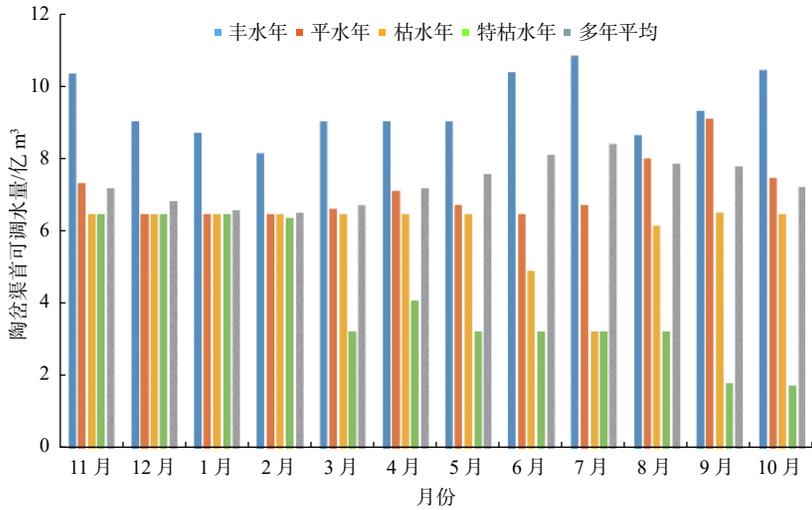


图4 陶岔渠首可调水量年内过程(方案1)

Fig. 4 Annual process diagram of adjustable water volume for the head of Taocha Canal (Scheme 3)

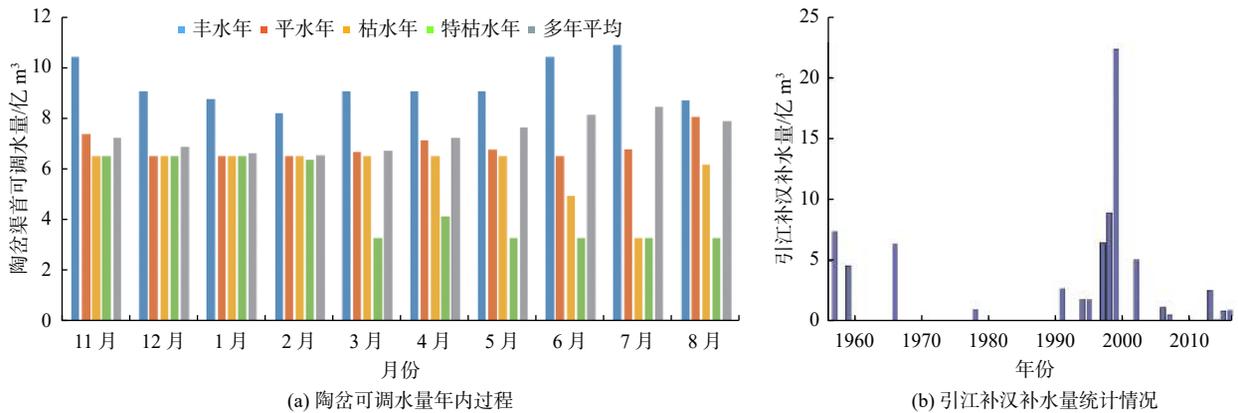


图5 方案2模拟计算结果

Fig. 5 Annual process diagram of the simulation results for Scheme 2

方案3求解的陶岔渠首引水调度图与引江补汉工程补水水位控制线结果见图6。方案3推求的长序列多年平均情景的计算指标结果见表1:与方案1相比,方案3陶岔渠首可供水量增加至107.9亿m³,减少水库年均弃水量10.5亿m³,在引江补汉工程补水作用下,汉江中下游可供水量达284.7亿m³、下游断面最小下泄流量达标率达98.9%。方案3陶岔渠首可调水量年内过程及引江补汉工程补水量统计情况见图7,可发现:方案3中陶岔渠首可调水量年内过程更为均匀,而丰平枯及特枯4个典型年过程在整个调度年度内呈现11月一次年6月逐渐减少,而6月至10月又逐渐增加分布特征,充分挖

掘供水期陶岔渠首可调水量;方案3中引江补汉工程在研究时段长序列范围内共计59个调度年进行补水,补水量范围分布于0.36亿~66.41亿m³/调度年。与方案2相比,方案3在4种典型来水情景下均启动了补水,只是丰、较丰来水过程中引江补汉工程补水时段较少,但在平、枯及特枯水年基本上全调度周期均在持续性向汉江中下游补水。综合分析,与方案2相比,方案3可更好地实现丹江口水库与引江补汉工程联合调度,通过引江补汉工程年均补水量28.8亿m³,置换增加陶岔渠首年均可供水量17.7亿m³,同时较好保障了清泉沟引水和汉江中下游用水需求。

4.4 方案 4 模拟计算结果

方案 4 的设置思路是考虑引江补汉工程建成后常年持续性向汉江中下游补水情景下陶盆渠首按加大流量 $420 \text{ m}^3/\text{s}$ 持续性引水, 结合工程设计参数模拟引江补汉工程补水量与陶盆渠首可供水量的置换的极端情况。需要说明的是, 该方案情景优先

充分利用引江补汉工程设计补水流量满足水库下游断面用水需求, 适当调减水库下泄流量值决策, 从而置换更多坝前水量向陶盆渠首引水, 但该方案的调度过程仍需遵循水库防洪调度安全, 若水库自身下泄流量可满足下游断面最小下泄流量要求, 则引江补汉工程在该时段不启用补水。

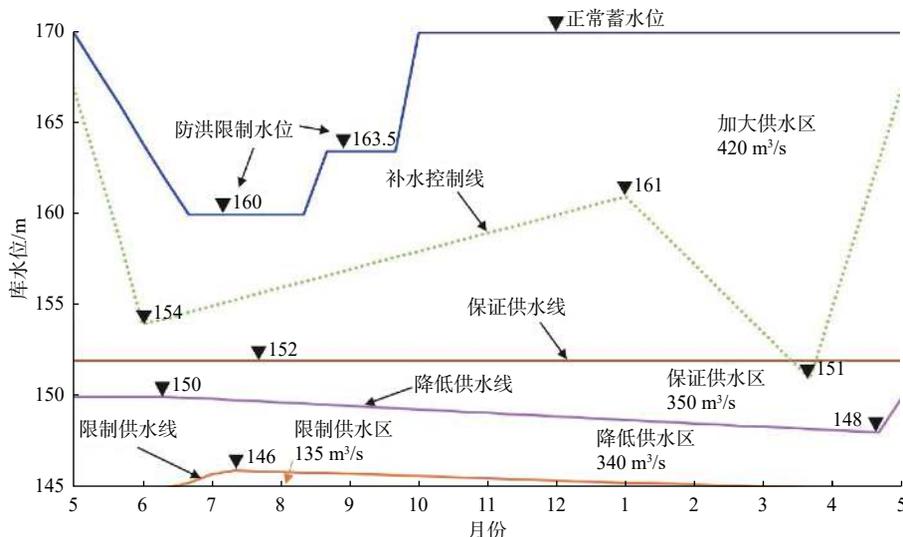


图 6 供水优化调度(方案 3)

Fig. 6 Optimized water supply operating curves (Scheme 3)

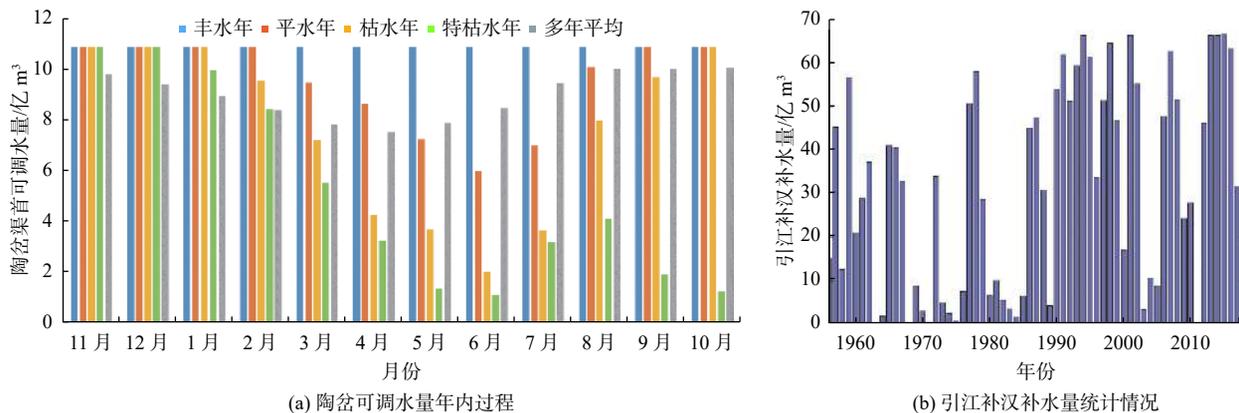


图 7 方案 3 模拟计算结果

Fig. 7 Annual process diagram of the simulation results for Scheme 3

方案 4 推求的长序列多年平均情景的计算指标结果见表 1: 与方案 1 相比, 方案 4 可增加陶盆渠首年均可供水量 25.8 亿 m^3 , 减少水库年均弃水量 14.8 亿 m^3 , 下游断面最小下泄流量达标率可达 99.2% 。与方案 2、3 对比: 方案 4 中引江补汉工程常年持续性承担汉江中下游黄家港断面的最小下泄流量需求, 提高的丹江口水库可供水量更多、水库弃水量更少; 方案 4 在丰、平、枯、特枯 4 种典型来水情景模拟计算结果基本与方案 3 类似, 但 4 种典型年过程中引江补汉工程启用补水时段增多。

方案 4 陶盆渠首可调水量年内过程及引江补汉工程补水量统计情况见图 8, 相比于方案 1 和 2, 可发现: 方案 4 中陶盆渠首多年平均可调水量的年内过程更为均匀; 方案 4 中陶盆渠首可调水量在 4 个典型年过程中的分布特征与方案 3 类似, 但在 1 月至 10 月时段内相比于方案 3 的可调水量均有小幅增加; 引江补汉工程在模拟长序列范围内每年均在启用且补水量为 $27.2 \text{ 亿} \sim 66.2 \text{ 亿 m}^3$ 。从可增加的陶盆渠首可供水量与引江补汉工程补水量置换的角度而言, 方案 4 中陶盆渠首可供水量受限于总干渠的引

水规模,两者水量的置换比约 1.0 : 2.3,表征其模拟情景下引江补汉工程引水量与可增加的陶盆渠首可供水量的置换效率低于方案 3;在方案 4 的基础上做进一步的研究思路延展,若未来陶盆渠首引水

总干渠引水规模有所扩大,则引江补汉工程常年持续性向汉江中下游补水可置换更多陶盆渠首可供水量。

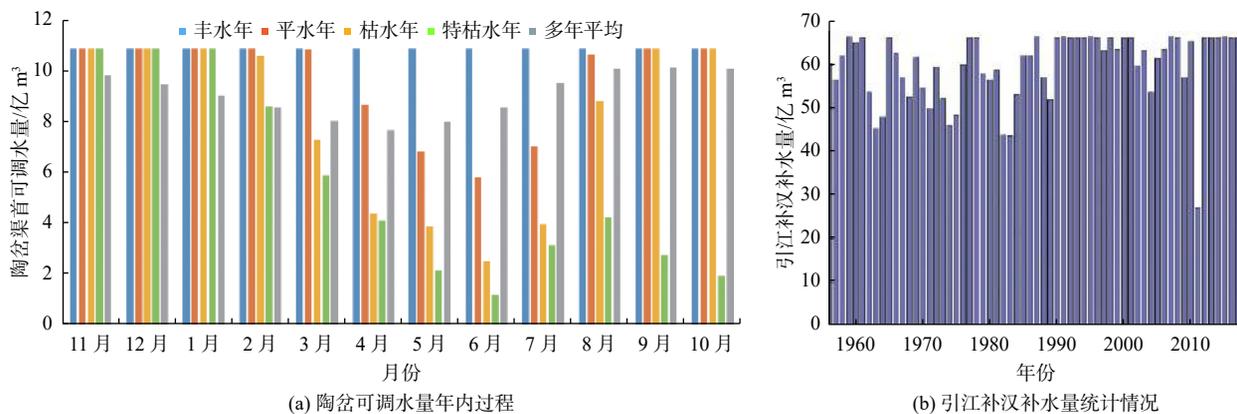


图 8 方案 4 模拟计算结果

Fig. 8 Annual process diagram of the simulation results for Scheme 4

5 结论

考虑未来引江补汉工程实施后对汉江中下游的补水作用,本研究构建了丹江口水库与引江补汉工程联合优化调度模型(方案 3),并设置多组方案进行对照分析,结论如下:

若将引江补汉工程定位为向汉江中下游相机补水(方案 2),可显著提升水库下游断面用水满足情况,但对丹江口水库坝前陶盆渠首、清泉沟渠首引水无增益。

若设置引江补汉工程坝前补水水位控制线,在陶盆渠首总干渠现状引水设计参数的约束下同步优化陶盆渠首引水调度线(方案 3),引江补汉工程年均补水量为 28.8 亿 m^3 ,置换陶盆渠首年均可增加引水量 17.7 亿 m^3 ,增加下游年均供水量 11.9 亿 m^3 。

若考虑充分挖掘引江补汉工程对汉江中下游的补水占比(方案 4),可增加陶盆渠首年均引水量 25.8 亿 m^3 ,但受限于陶盆渠首总干渠现状引水设计参数约束,引江补汉工程补水量与可增加的陶盆渠首可供水量置换比相比于方案 3 有所降低。

综上所述,本文所构建的考虑引江补汉工程实施后的丹江口水库优化调度模型(方案 3)可较好地实现丹江口水库与引江补汉工程联合运行的有效衔接,可在保障汉江中下游用水、清泉沟引水的前提下实现引江补汉引水量与陶盆渠首新增可供水量之间的高效置换,基于引江补汉工程的实施进一步发掘中线水源工程可供北调水量的潜力,可为引

江补汉工程实施后丹江口水库供水调度策略优化提供技术参考,实现水工程联合调度有效衔接。今后,从研究可探索的角度出发,如果将来中线受水区、汉江中下游等用水对象对中线水源工程提出更高的调用水要求时,可在本研究基础上做进一步的拓展与模拟,如结合汉江流域梯级规划及汉江流域径流特征分析,开展丹江口水库汛期洪水资源化利用研究^[25],适当抬高汛期运行水位为坝前引水决策带来新的增益空间,并进一步挖掘丹江口水库的可调水量潜力。

参考文献:

- [1] 葛锦浩. 南水北调中线工程河南段社会效益研究[J]. 价值工程, 2022, 41(17): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2022.17.002.
- [2] 韩江波, 陈雯. 南水北调中线工程驱动受水区高质量发展的基本效应[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(4): 7-15, 23. DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2022.04.03.
- [3] 李红艳, 付景保, 褚钰, 等. 基于人水和谐的南水北调中线运行效果评价: 以河南典型受水区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 93-101. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0011.
- [4] 陈浩, 靖争, 倪智伟, 等. 基于主成分-聚类分析的南水北调中线干渠水质时空分异规律研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(7): 36-44. DOI: 10.11988/ckyyb.20210272.

- [5] 孙甲, 韩品磊, 王超, 等. 南水北调中线总干渠水质状况综合评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 102-112. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0141](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0141).
- [6] 张婷婷, 杨刚, 张建国, 等. 南水北调东线一期工程输水干线水质变化趋势分析[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(1): 8-15. DOI: [10.15928/j.1674-3075.202106290208](https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202106290208).
- [7] NONG X Z, SHAO D G, ZHONG H, et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WOI) method[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115781. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115781](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781).
- [8] 刘善焜, 李贵宝. 南水北调工程的巨大综合效益[J]. *南水北调与水利科技*, 2003(S1): 40-42. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2003.s1.020](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2003.s1.020).
- [9] 张健全. 论南水北调中线工程对源头丹江口县域经济结构的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2005(4): 14-16. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1683.2005.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1683.2005.04.005).
- [10] 关爱萍. 南水北调工程受水区经济效应评价: 以河南省为例[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2008(6): 29-36. DOI: [10.16493/j.cnki.42-1627/c.2008.06.017](https://doi.org/10.16493/j.cnki.42-1627/c.2008.06.017).
- [11] 孟猛. 气候变化对南水北调中线可调水量及供水风险影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [12] MEN B H, WU Z J, LI Y S, et al. Reservoir operation policy based on joint hedging rules[J]. *Water*, 2019, 11(3): 419. DOI: [10.3390/w11030419](https://doi.org/10.3390/w11030419).
- [13] 马嘉悦. 丹江口水库供水调度研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [14] 张璐, 卢一杰, 张增信, 等. 南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1148-1157. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0113](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0113).
- [15] 曾凌, 陈金凤, 刘秀林. 南水北调中线工程运行以来汉江中下游水文情势演变分析[J]. *水文*, 2022, 42(6): 1-7. DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.20210462](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20210462).
- [16] 班璇, 师崇文, 郭辉, 等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 1-7. DOI: [10.3880/j.issn.1006-7647.2020.04.001](https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2020.04.001).
- [17] 王一文, 李伟, 王亦宁, 等. 推进京津冀水资源保护一体化的思考[J]. *中国水利*, 2015, 1: 1-4, 37. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2015.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2015.01.002).
- [18] 仲志余, 刘国强, 吴泽宇. 南水北调中线工程水量调度实践及分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 95-99, 143. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180015](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180015).
- [19] 胡砚霞, 于兴修, 廖雯, 等. 汉江流域产水量时空格局及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(1): 73-82. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj202201007](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202201007).
- [20] 王何予, 田晶, 邓乐乐, 等. 基于IHA-RVA法分析汉江中下游水文情势变化[J]. *水资源研究*, 2021, 10(4): 350-361. DOI: [10.12677/JWRR.2021.104038](https://doi.org/10.12677/JWRR.2021.104038).
- [21] 杨哲, 黄倩影, 张媛媛. 基于系统观念探究新时期南水北调中线水生态环境保护[C]//第十届中国水生态大会论文集. 河南, 2022.
- [22] 李千珣, 郭生练, 邓乐乐, 等. 汉江流域水生态文明建设评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 498-505. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0050](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0050).
- [23] 王世猛, 万宝春, 王路光, 等. 南水北调中线河北段水质保护环境风险分析研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 123-125. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.029).
- [24] ZHANG H, CHEN Z Y, TANG C Y. Quantifying groundwater recharge and discharge for the middle reach of Heihe River of China using isotope mass balance method[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(3): 225-232. DOI: [10.19637/j.cnki.2305-7068.2021.03.005](https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2021.03.005).
- [25] 水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划(2012—2030年)[M]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2012.
- [26] 水利部长江水利委员会. 引江补汉工程可行性研究报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2021.
- [27] 黄会勇, 张娜, 万蕙, 等. 引江补汉工程引江规模初步分析[J]. *人民长江*, 2018, 49(18): 15-19. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.18.004](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.18.004).
- [28] LIU H, YIN J, FENG L. The dynamic changes in the storage of the Danjiangkou Reservoir and the influence of the South-North Water Transfer Project[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8701-8722. DOI: [10.1038/s41598-018-26788-5](https://doi.org/10.1038/s41598-018-26788-5).
- [29] MING B, LIU P, GUO S L, et al. Optimizing utility-scale photovoltaic power generation for integration into a hydropower reservoir by incorporating long- and short-term operational decisions[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 432-445. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.07.046](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.046).

Analysis on the adjustable water volume of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project after the implementation of the water diversion from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River

XU Jijun^{1,2}, ZHANG Xiaoqi^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2}, LI Qingqing^{1,2}, YIN Zhengjie^{1,2}, WANG Yongqiang^{1,2}

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environment, Wuhan 430010, China)

Abstract: The Middle Route of South-to-North Water Transfers Project (MRSWTP) is a major strategic infrastructure to alleviate the serious shortage of water resources in northern China. The first phase of the MRSWTP has been put into operation since 2014. By the 8th anniversary of the operation of the MRSWTP on December 12, 2022, the cumulative water inflow from the head of the Taocha Canal has exceeded 53 billion m³, with a direct beneficiary population of more than 85 million people. Thus, the completion and operation of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project (MRSWTP) have significantly improved the water resources conditions and water supply guarantee degree of the cities in the water receiving area of the middle route, and achieved great social and economic benefits. In the face of the needs of the national development strategy in the new era, the supply and demand sides of the water resources allocation of the MRSWTP have changed. On the one hand, with the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei and the construction of Xiong'an New Area, the water supply objects and scope of the MRSWTP have been expanded and adjusted, and the water transferred from the MRSWTP has become the main water source of large and medium-sized urban areas along the Beijing-Tianjin-Hebei line. The current change of water supply situation puts forward new water transfer requirements for the MRSWTP in terms of water quantity and water supply guarantee. On the other hand, the inter-annual variation of the incoming water from the Hanjiang River basin is large, which has affected the water supply guarantee of the Danjiangkou Reservoir. With the commencement of the construction of the water diversion project from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River (WDP-TH), it is very necessary to carry out the research on the joint operation mode of the Danjiangkou Reservoir and the WDP-TH.

Based on the design parameters of the WDP-TH, the adjustable water volume of the MRSWTP after the implementation of the WDP-TH is analyzed and four research schemes are put forward as follows: (1) Scheme 1, the current water supply operating scenario of the Danjiangkou Reservoir, which is the benchmark scheme; (2) Scheme 2, the WDP-TH starts to transfer water when the reservoir release can not satisfy the minimum discharge flow requirements of the downstream section; (3) Scheme 3, the water transfer control line of the WDP-TH is added in the water supply operating curves of the Danjiangkou Reservoir, and water transfers rules of Taocha are optimized synchronously; and (4) Scheme 4, the WDP-TH continuously transfers water to the middle and lower reaches of the Hanjiang River throughout the year, and the transfers flow of the Taocha is 420 m³/s.

The results show that the effective connection between the water supply of Danjiangkou Reservoir and the water supply decision of the water transfers project can be realized by two schemes, i.e., Scheme 3 and Scheme 4, both of which can effectively use the water transfers of the WDP-TH to increase the available water supply volume of the MRSWTP (the increment is 1.77 billion m³ to 2.58 billion m³.) and reduce the reservoir waste water (the decrease is 10.5 billion m³ to 14.8 billion m³) on the premise of ensuring the water demand of the middle and lower reaches of the Hanjiang River.

This research can provide technical support for the adjustment of the water transfer mode of the MRSWTP after the completion of the WDP-TH in the future, and realize effective connection between the above two projects.

Key words: adjustable water volume; water transfers from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River; Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; water supply guarantee; transfer flow