

刘鸿鑫, 王丽梅, 吴承君. 南水北调西线工程调水对洮河梯级水电站发电影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1091-1099. LIU H X, WANG L M, WU C J. Influence of water transferring from the Western Route of South-to-North Water Transfers Project on power generation of the cascade hydropower stations in the Taohe River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1091-1099. (in Chinese)

## 南水北调西线工程调水对洮河 梯级水电站发电影响

刘鸿鑫<sup>1</sup>, 王丽梅<sup>1</sup>, 吴承君<sup>2,3</sup>

(1. 华北水利水电大学土木与交通学院, 郑州 450045; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 3. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 郑州 450003)

**摘要:** 为分析南水北调西线工程上下线组合调水方案和下线调水方案对洮河梯级水电站发电影响, 分别针对南水北调西线工程不同调水方案、不同调水模式, 研究对洮河干流梯级水电站扩机、发电等的影响。结果表明: 南水北调西线工程调水可大幅增加洮河梯级水电发电效益, 其中, 基于下线调水方案的增加值约为上下线组合调水方案的 2 倍, 而丰多枯少调水模式对洮河梯级水电增加效益小于均匀调水模式。

**关键词:** 南水北调西线; 洮河; 梯级水电站; 水电扩机; 保证出力

**中图分类号:** TV7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0108

针对南水北调西线工程的论证已持续数十年之久。赵勇等<sup>[1]</sup>基于南水北调西线下线调水方案, 提出黄河几字弯水网整体框架, 以提高受水区供水保障率。张金良等<sup>[2]</sup>提出以受水区清洁能源利润代替国家投资和基于电价补贴反哺南水北调西线一期工程的投融资方案。李庆国等<sup>[3]</sup>通过分析南水北调西线一期调水对黄河干流梯级发电作用, 指出南水北调西线调水可显著提升黄河干流梯级水电站发电效益。张金良等<sup>[4]</sup>通过可调水量、经济效益等多指标对比, 论证提出南水北调西线工程下移方案。聂常山等<sup>[5]</sup>采用多种水利经济分析方法, 计算南水北调西线一期工程对受水区的经济社会效益, 并分析对调水区生态环境的影响。席海洋等<sup>[6]</sup>分析南水北调西线工程调水对受水区生态的影响作用。张金良等<sup>[7]</sup>通过深入比选南水北调西线工程原规划调水方案与调水断面下移方案, 提出南水北调西线工程上下线组合调水方案。王煜等<sup>[8]</sup>基于黄河流域水资源均衡调配模型, 研究南水北调西线一期工程水量配置策略。李福生等<sup>[9]</sup>通过研究受水区的缺水形势, 指出南水北调西线一期工程调水可基本解决受

水区生活、工业等的刚性用水需求。杨立彬等<sup>[10]</sup>通过分析南水北调西线工程受水区节水现状及节水潜力, 指出了南水北调西线工程调水的必要性。张金良等<sup>[11]</sup>研究提出叶巴滩—两河口—双江口—洮河联合自流方案作为西线调水断面下移方案。景来红等<sup>[12]</sup>通过优化南水北调西线工程上线调水方案及规模, 提出金沙江岗托水库抽水 40 亿 m<sup>3</sup> 和雅砻江、大渡河联合调水 40 亿 m<sup>3</sup> 的一期调水方案。张金良等<sup>[13]</sup>通过分析南水北调西线工程及一期工程布局方案, 认为一期工程已具备可行性研究条件。

针对南水北调西线一期工程调水 80 亿 m<sup>3</sup>, 拟定了上线、上下线组合(上线、下线分别调水 40 亿 m<sup>3</sup>) 和下线 3 种方案, 其中上下线组合方案和下线方案线路均通过九甸峡水库进入洮河并通过洮河进入黄河干流刘家峡水库。现有研究主要针对黄河干流或受水区, 从供水保证率、投融资方案、发电效益、经济效益以及调水方案等方面展开, 针对南水北调西线工程建设运行对洮河梯级水电站的发电影响研究较少。基于此, 本文通过构建梯级水电

收稿日期: 2024-04-21 修回日期: 2024-11-09 网络出版时间: 2024-11-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241111.1648.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206700); 黄河水利科学研究院科技发展基金项目(黄科发 202218; 黄科发 202304)

作者简介: 刘鸿鑫(1998—), 男, 江西上饶人, 主要从事梯级水库优化调度研究。E-mail: 2740515778@qq.com

通信作者: 吴承君(1991—), 男, 河南濮阳人, 工程师, 博士, 主要从事梯级水库优化调度研究。E-mail: 2294058057@qq.com

站发电量最大模型和梯级水电站保证出力计算模型,运用双层改进入侵杂草算法和梯级水电站扩机潜力分析方法,针对南水北调西线一期工程不同调水方案,分析洮河梯级水电站扩机潜力,在此基础上,开展南水北调西线一期工程不同调水工况下洮河梯级水电站增发电量和保证出力分析,为南水北调西线一期工程调水实施后洮河梯级水电站优化调度运行提供科学依据。

## 1 研究区概况

洮河位于甘肃省东南部,是黄河右岸一级支流。径流资料采用《黄河流域(片)第三次水资源调查评价》中洮河干流下巴沟、岷县、李家村和红旗等水文站 1956—2016 年系列水文成果。南水北调西线一期工程下线方案从长江流域调水至洮河干流西寨附近,影响洮河干流九甸峡及以下 10 座梯级水电站,其中九甸峡水库为年调节水库,调节库容为 5.72 亿  $m^3$ 。洮河干流水文站天然径流量见表 1,南水北调西线一期工程影响的洮河梯级水电站特性资料见表 2。

表 1 洮河干流水文代表站天然径流量

水文站	多年平均径流量	不同频率年径流量			
		20%	50%	75%	95%
下巴沟	14.74	20.07	15.26	12.02	8.23
岷县	31.90	42.41	32.76	26.18	18.39
李家村	39.21	52.37	40.24	31.99	22.27
红旗	46.32	60.55	46.61	37.14	25.94

表 2 洮河干流 11 级梯级水电站特性

水电站	装机/MW	调节性能	装机利用时间/h	开发方式
九甸峡	3×100	年调节	3 500	混合式
莲麓一级	3×22	日调节	4 000	河床式
莲麓二级(峡城)	3×12.5	日调节	3 300	河床式
吉利	2×10	日调节	4 400	引水式
海甸峡	3×20	日调节	4 800	坝式
三甲	3×10.5	日调节	5 000	坝式
杨家河	3×12.5	日调节	4 000	引水式
杨家河二级	3×7+3×3.5	日调节	3 300	引水式
齐家坪	16.5	日调节	4 500	引水式
新民滩	12.52	日调节	5 700	引水式
达板	10.6	日调节	5 300	河床式

## 2 研究模型与方法

在满足库区和河道引用水要求的基础上,南水北调西线一期工程下线调水后,岷县断面多年平均径流量将增加 1 倍以上,九甸峡等 11 座梯级水库的发电效益也将大幅增加,若不扩机将产生大量弃水。为量化分析南水北调西线一期工程不同调水方案对洮河九甸峡梯级水电站的发电影响,本文从洮河梯级水电站扩机潜力、保证出力和发电量 3 方面着手展开研究。

### 2.1 梯级水电站发电量最大模型

以洮河梯级水电站发电量最大为目标,以年为调度期、以月为调度时段(相邻两库间的水流滞时忽略不计),构建洮河梯级水电站发电量最大模型,模型目标函数为

$$F_E = \max \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T k_i Q_{gen,i,t} h_{i,t} \Delta t_i \quad (1)$$

式中:  $F_E$  为洮河梯级水电站发电量最大目标函数;  $M$  为洮河梯级水电站个数;  $T$  为调度期内调度时段数,月;  $k_i$  为第  $i$  级水电站综合出力系数;  $Q_{gen,i,t}$  为第  $i$  级水电站第  $t$  时段的发电流量,  $m^3/s$ ;  $h_{i,t}$  为第  $i$  级水电站第  $t$  时段的发电水头,  $m$ ;  $\Delta t_i$  为第  $t$  时段的时间长度,  $s$ 。

满足如下约束条件:

水量平衡约束: 包括水库出入库水量平衡和上下游毗邻两级水库间的水量耦合约束。

$$\begin{cases} q_{in,i,t} \Delta t_i + V_{i,t-1} = q_{out,i,t} \Delta t_i + V_{i,t} + W_{d,i,t} + W_{e,i,t} \\ q_{in,i+1,t} = q_{out,i,t} + q'_{i+1,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q_{in,i,t}$ 、 $q_{out,i,t}$ 、 $q'_{i+1,t}$  分别为第  $i$  级水库第  $t$  时段的平均入库流量、平均出库流量以及第  $i+1$  级水库第  $t$  时段的区间平均入库流量,  $m^3/s$ ;  $V_{i,t-1}$ 、 $V_{i,t}$  分别为第  $i$  级水库第  $t$  时段初、末库容,  $m^3$ ;  $W_{d,i,t}$ 、 $W_{e,i,t}$  分别为第  $i$  级水库第  $t$  时段的库区引水量和蒸散发水量,  $m^3$ ; 其他参数含义同上。

供(引)水约束: 包括用水户从库区引水的最大和最小引水流量约束,其中从河道中的引水流量计入与其直接相连的水库库区引水。

$$Q_{DSup,i,t} \leq Q_{Sup,i,t} \leq Q_{MSup,i,t} \quad (3)$$

式中:  $Q_{Sup,i,t}$ 、 $Q_{DSup,i,t}$ 、 $Q_{MSup,i,t}$  分别为第  $i$  级水库第  $t$  时段引水流量、最小引水需求流量和最大可引水流量,  $m^3/s$ 。

河道生态流量约束: 满足水库下游河道的最小生态流量约束。

$$Q_{E,i,t} \leq q_{out,i,t} \quad (4)$$

式中:  $Q_{E,i,t}$  为第  $i$  级水库第  $t$  时段下游生态流量,  $m^3/s$ ; 其他参数含义同上。

兴利库水位(库容)约束: 包括水库正常兴利调度的上限水位约束和下限水位约束。

$$Z_{i,d} \leq Z_{i,t} \leq Z_{max,i,t} \quad (5)$$

式中:  $Z_{i,t}$  为第  $i$  级水库第  $t$  时段初库水位,  $m$ ;  $Z_{i,d}$  为第  $i$  级水库死水位约束,  $m$ ;  $Z_{max,i,t}$  为第  $i$  级水库第  $t$  时段初的正常蓄水位约束,  $m$ 。

水电站装机容量约束: 水电站最大出力不大于其装机容量限制。

$$0 \leq N_{i,t} \leq \bar{N}_i \quad (6)$$

式中:  $N_{i,t}$ 、 $\bar{N}_i$  分别为第  $i$  级水库第  $t$  时段的出力和第  $i$  级水库装机容量,  $kW$ 。

水电站过机流量约束: 水电站机组发电流量小于机组最大过机流量约束。

$$0 \leq Q_{gen,i,t} \leq Q_{Gmax,i} \quad (7)$$

式中:  $Q_{Gmax,i}$  为第  $i$  级水库机组最大过流能力,  $m^3/s$ ; 其他参数含义同上。

机组振动区约束: 水电站机组发电水头不宜位于机组振动区水头区间运行(本文仅针对现状梯级水电站模拟调度时考虑机组振动区约束, 针对扩机后的水电站暂不考虑该约束)。

$$(h_{i,t} - h_{i,j,min}) \cdot (h_{i,t} - h_{i,j,max}) > 0 \quad (8)$$

式中:  $h_{i,j,max}$ 、 $h_{i,j,min}$  分别为第  $i$  级水电站第  $j$  个振动区的上限和下限水头,  $m$ ; 其他参数含义同上。

水电站发电水头约束: 包括水电站最小可发电水头和最大发电水头约束。

$$h_{i,t,min} \leq h_{i,t} \leq h_{i,t,max} \quad (9)$$

式中:  $h_{i,t,min}$ 、 $h_{i,t,max}$  分别为第  $i$  级水库第  $t$  时段发电水头下限和上限,  $m$ ; 其他参数含义同上。

根据构建的洮河梯级水电站发电量最大模型, 通过模拟试算, 确定南水北调西线一期工程调水后洮河梯级水电站扩机潜力及发电量。

## 2.2 梯级水电站保证出力计算模型

保证出力是衡量水电站发电水平的重要指标。常用保证出力计算方法包括等流量法和等出力法<sup>[14-17]</sup>, 多个研究<sup>[18-19]</sup>表明, 基于等出力法的水电站保证出力计算结果优于等流量法。针对年调节水库, 常规等出力法通过假设一出力值  $N'$ , 供水期按照  $N'$  进行发电模拟, 控制条件为供水期初水库蓄满, 供水期末水库水位降至死水位。常规等出力法虽

然原理简单, 但在实际模拟过程中, 受初始假定出力值、入库径流情况、库水位约束等多重影响, 上述基于二分法的模拟计算过程易陷入死循环。

考虑到常规等出力法存在的缺陷, 本文基于优化原理, 提出一种基于优化等出力法的保证出力计算方法, 其优化目标是使供水期内各时段出力值尽可能相等, 目标函数为

$$F_0 = \min \sum_{t=1}^{T_s} \left| \sum_{i=1}^M N_{i,t} - \frac{1}{T_s} \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^{T_s} N_{i,t} \right| \quad (10)$$

式中:  $F_0$  为梯级水电站保证出力计算模型目标函数;  $T_s$  为供水期调度时段数, 月; 其他参数含义同上。

模型约束条件同梯级水电站发电量最大模型约束。

## 2.3 模型求解方法

### 2.3.1 优化模型求解方法

梯级水电站优化调度模型属于典型的高维、非线性、多约束优化问题, 传统的优化求解方法(如动态规划算法)在模型求解过程中存在“维数灾”问题<sup>[20-23]</sup>。文献<sup>[24-26]</sup>基于野生杂草在自然界的繁殖机制, 提出双层改进入侵杂草(two-layer improved invasive weed optimization algorithm, TIWO)算法, 并利用多个复杂优化函数验证了该算法的收敛性和鲁棒性。因此, 本文采用 TIWO 算法分别求解洮河梯级水电站发电量最大模型和保证出力计算模型。基于 TIWO 算法的模型求解流程见图 1。

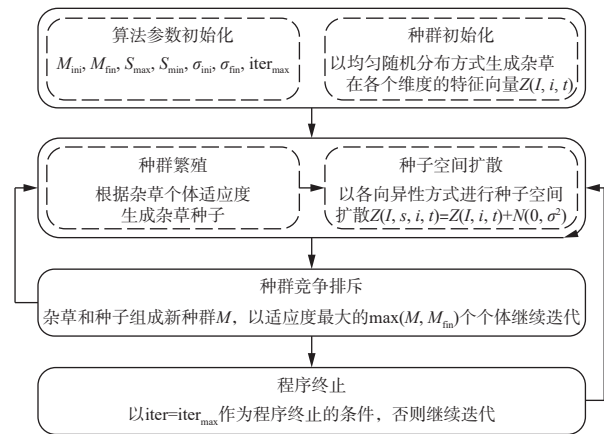


图 1 基于 TIWO 算法的模型求解流程

Fig. 1 Flowchart of model solving based on TIWO algorithm

图 1 中,  $M_{ini}$ 、 $M_{fin}$  分别为算法中杂草初始种群数和最大种群数;  $S_{max}$ 、 $S_{min}$  分别为每棵杂草在迭代过程中可生成的最大种子数和最小种子数;  $\sigma_{ini}$ 、 $\sigma_{fin}$  分别为标准差初值和标准差终值;  $iter$ 、 $iter_{max}$  分别为算法当前迭代次数和最大迭代次数;  $Z(I, i, t)$  为第  $I$  颗杂草在第  $i$  级水电站第  $t$  时刻的水位,  $m$ ;



$Z(I, s, i, t)$  为第  $I$  颗杂草生成的第  $s$  个种子在第  $i$  级水电站第  $t$  时刻的水位,  $m$ ;  $N(0, \sigma^2)$  为以 0 为均值,  $\sigma$  为标准差的高斯变量。

### 2.3.2 梯级水电站扩机潜力分析方法

以洮河梯级各水电站现状年装机利用小时数为基准, 通过假定各水电站扩机规模, 利用洮河梯级水电站发电量最大模型求解各水电站发电量和装机利用小时数, 从而确定洮河梯级水电站扩机潜力。梯级水电站扩机潜力分析流程如下:

- ① 假设第  $i$  座水电站扩机后规模为  $N'_{c,i}$  ( $N'_{c,i} > N_{c,i}$ ), 其中  $N_{c,i}$  为第  $i$  座水电站现状装机容量。
- ② 以南水北调西线一期工程调水后的入库流量过程作为梯级水电站发电量最大模型的输入, 通过模型求解计算第  $i$  座水电站发电量  $E_i$ 。
- ③ 根据  $T'_{c,i} = E_i/N'_{c,i}$  计算第  $i$  座水电站年装机利用小时数。

④ 若  $T'_{c,i} > T_{c,i}$  (其中  $T_{c,i}$  为第  $i$  座水电站现状年装机利用小时数), 则重新假定第  $i$  座水电站扩机后规模  $N''_{c,i}$  ( $N''_{c,i} > N'_{c,i}$ ), 返回步骤②; 否则, 重新假定第  $i$  座水电站扩机后规模  $N''_{c,i}$  ( $N''_{c,i} < N'_{c,i}$ ), 返回步骤②。直至  $|T'_{c,i} - T_{c,i}|/T_{c,i} < \varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  为设定的一个大于 0 的极小值。

## 3 南水北调西线一期工程调水方案拟定

由于南水北调西线一期工程上线调水方案不经过洮河, 因此仅针对南水北调西线一期工程上下线组合调水和下线调水 2 种方案展开讨论。根据《南水北调西线工程规划方案比选论证》结果, 南水北调西线一期工程上下线组合调水方案进入洮河水量为 40 亿  $m^3$ , 南水北调西线一期工程下线调水方案进入洮河水量为 80 亿  $m^3$ 。基于此, 本文分别针对上述两种调水方案拟定 4 种调水模式见表 3。

表 3 南水北调西线一期工程调水模式

Tab. 3 Water diversion mode of the first phase of the Western Route of the South-to-North Water Transfers Project

调水方案	上下线组合方案		下线方案		检修期
	均匀调水模式	丰多枯少调水模式	均匀调水模式	丰多枯少调水模式	
调水量/亿 $m^3$	40	40	80	80	
调水流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	138.20	176.13(丰水期) 91.98(枯水期)	276.40	352.25(丰水期) 183.96(枯水期)	4月份

注: 考虑长江流域丰水期和枯水期来水比例情况, 丰多枯少调水模式按丰水期(5—10月)调水比例70%, 枯水期(11月—次年4月)调水比例30%计; 检修期不调水; 调水后, 九旬峡水库调节性能将由年调节变为不完全年调节。

## 4 结果分析

### 4.1 洮河梯级水电站扩机潜力分析

基于水电站年装机利用小时数分析水电站扩机潜力。由于水电站年装机利用小时数为水电站多年平均发电量与水电站装机容量的比值, 而水电站多年平均发电量通常根据长系列来水过程通过发电模拟计算得出, 在水电站规划阶段, 有时为减少工作量, 也可利用多年平均来水过程通过发电模拟估算水电站多年平均发电量。因此, 为减少工作量, 针对涉及洮河梯级水电站多年平均发电量的计算, 以洮河多年平均来水过程作为模型输入条件进行估算。

由于洮河九旬峡以下梯级水电站中吉利、杨家河、杨家河二级、齐家坪、新民滩 5 座水电站均为引水式电站, 受引水流量限制, 扩机难度大, 暂不考虑扩机。因此, 本次仅针对九旬峡、莲麓一级、莲麓二级(峡城)、海甸埃、三甲、达板 6 座水电站开展扩

机潜力分析。

不考虑洮河梯级水电站扩机条件下, 以洮河多年平均来水过程作为模型输入, 针对南水北调西线一期工程不同调水方案 and 不同调水模式, 通过求解洮河梯级水电站发电量最大模型, 计算得洮河梯级水电站弃水情况见图 2。

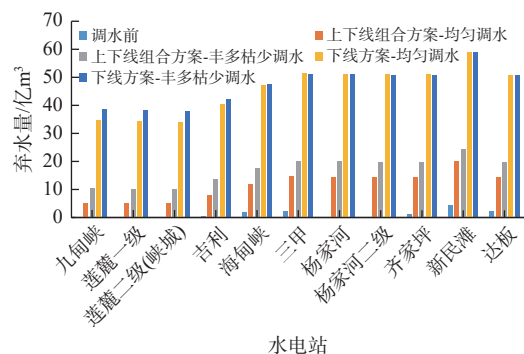


图 2 不考虑扩机条件下洮河梯级水电站弃水情况

Fig. 2 Water abandonment of the cascade hydropower station in the Taohe River without considering the expansion condition

由图 2 可知:在不考虑洮河梯级水电站扩机条件下,南水北调西线一期工程调水前,洮河梯级水电站弃水量较少;而考虑南水北调西线一期工程调水后,洮河梯级水电站弃水量显著增加。针对同一调水模式下的不同调水方案,洮河梯级水电站弃水量增加比例不同,其中:均匀调水模式下,下线方案梯级水电站弃水量约为上下线组合方案的 3.95 倍;而丰多枯少调水模式下,下线方案梯级水电站弃水量约为上下线组合方案的 2.78 倍。针对同一调水方案下的不同调水模式,均表现为丰多枯少调水模式梯级水电站弃水量大于均匀调水模式下的弃水

量,其中,上下线组合方案的丰多枯少调水模式下的梯级水电站弃水量约为均匀调水模式的 1.46 倍,而下线方案仅为 1.02 倍。

由上述分析可知,南水北调西线一期工程调水后,为减少梯级水电站弃水,增加水电站水能利用率,需对洮河梯级水电站进行扩机。基于洮河梯级水电站发电量最大模型,通过大量模拟试算,南水北调西线一期工程调水后,洮河梯级水电站在不同调水方案 and 不同调水模式下扩机后的规模及水电站弃水情况见表 4。

表 4 洮河梯级水电站扩机后装机容量及弃水量

Tab. 4 Installed capacity and water abandoned after expansion of the Taohe River cascade hydropower stations

水库	现状装机/ MW	上下线组合方案				下线方案			
		均匀调水	均匀调水	丰多枯少调水	丰多枯少调水	均匀调水	均匀调水	丰多枯少调水	丰多枯少调水
		装机/MW	弃水量/亿m <sup>3</sup>	装机/MW	弃水量/亿m <sup>3</sup>	装机/MW	弃水量/亿m <sup>3</sup>	装机/MW	弃水量/亿m <sup>3</sup>
九甸峡	300.0	600.0	0	580.0	0	900.0	0	868.0	0
莲麓一级	66.0	131.0	0	132.0	0	201.0	0	200.0	0
莲麓二级	37.5	75.0	0	75.5	0	112.5	0	112.5	0
海甸峡	60.0	120.0	0	120.0	0	185.0	0	180.0	0
三甲	31.5	64.5	0	63.5	0	96.5	0	96.5	0
达板	10.6	20.1	0	20.1	0	29.1	0	28.6	0
合计	505.6	1010.6	0	991.1	0	1524.1	0	1485.6	0

由表 4 可知,南水北调西线一期工程上下线组合调水方案下,九甸峡、莲麓一级、莲麓二级(峡城)、海甸峡、三甲、达板 6 座水电站扩机规模均约为原装机容量的 1 倍,而下线调水方案下 6 座水电站扩机规模均约为原装机容量的 2 倍。同时,考虑洮河梯级水电站扩机后,南水北调西线一期工程不同调水方案、不同调水模式下,扩机后的水电站弃水量均为 0,表明洮河梯级水电站扩机可显著提高南水

北调西线一期工程调水后的水能资源利用率。针对扩机后不同调水方案、调水模式下弃水量均为 0 的情况,以九甸峡水电站为例进行解释说明,虽然不同调水方案、调水模式下九甸峡库水位(除 5 月初以死水位作为起调水位外)均处于水库正常运行的最高水位(正常蓄水位或汛限水位),但由于各时段出力均小于扩机后装机容量,所以弃水为 0。九甸峡水电站扩机后水位及出力情况见图 3。

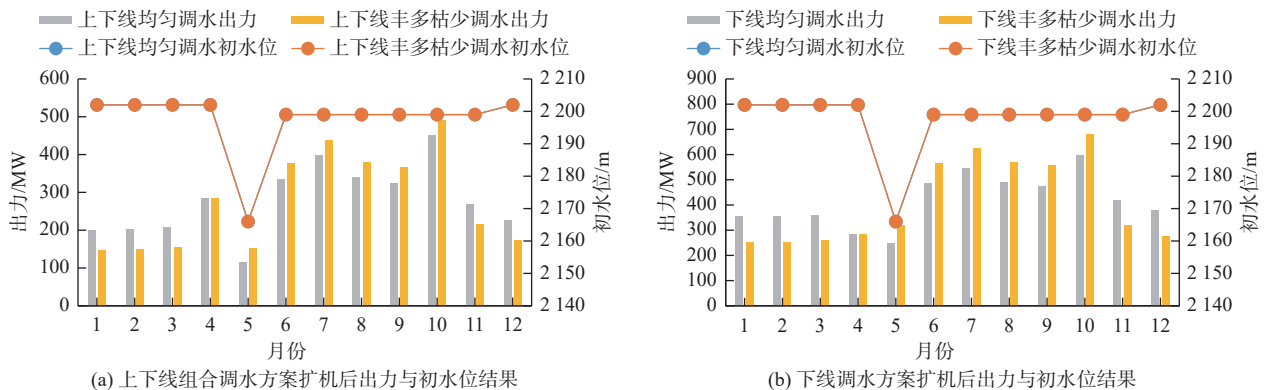


图 3 九甸峡水电站扩机后水位及出力

Fig. 3 Water level and output of Jiudianxia hydropower station after expansion

### 4.2 洮河梯级水电站增发电量分析

以不同工况下的洮河梯级水电站多年平均发电量作为其增发电量分析的依据。在同时考虑南水北调西线一期工程调水后洮河梯级水电站不扩机与扩机的基础上,以洮河多年平均来水过程作为模

型输入,通过求解洮河梯级水电站年发电量最大模型,南水北调西线一期工程不同调水方案、不同调水模式下的洮河梯级水电站不扩机与扩机年发电量情况见图 4。

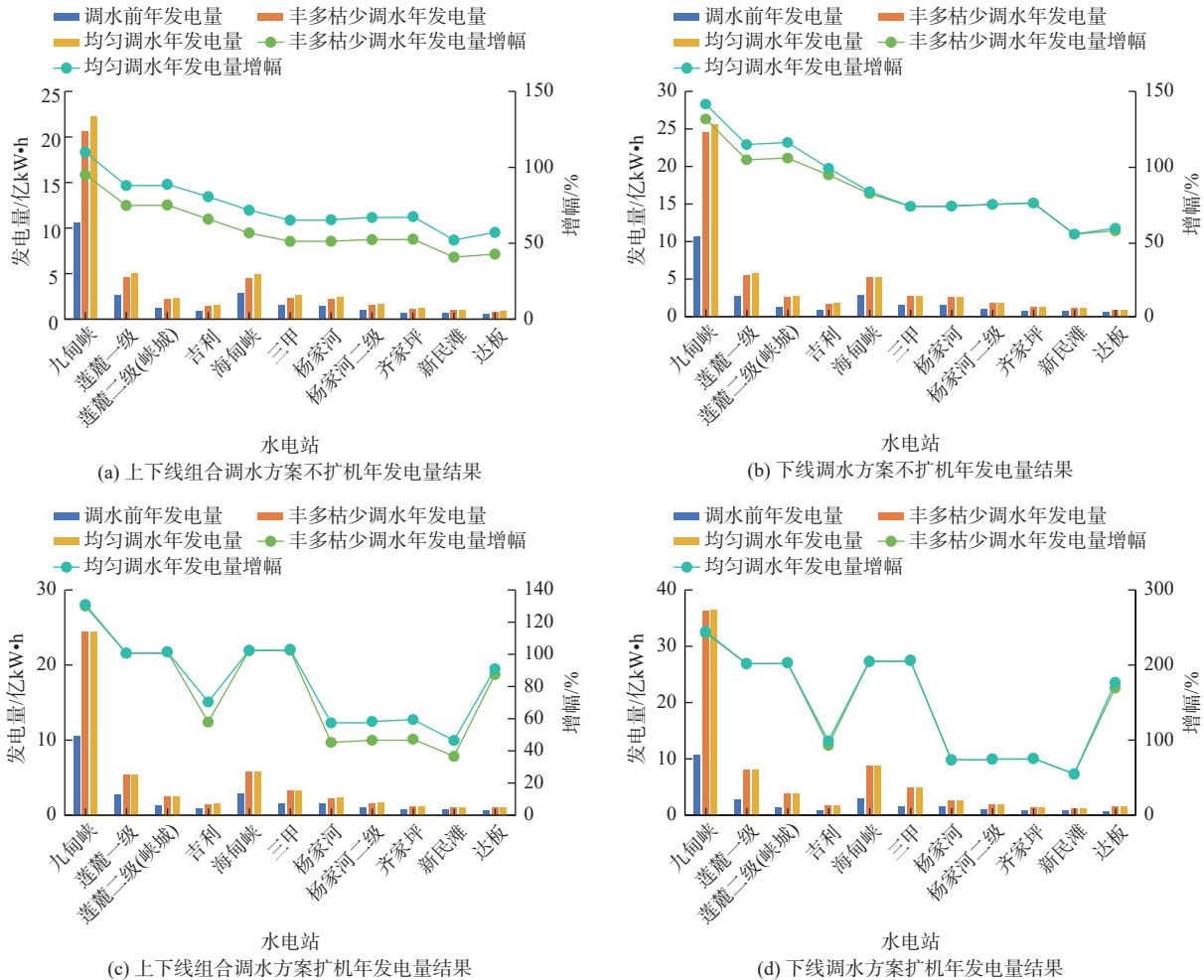


图 4 南水北调西线一期调水条件下洮河梯级水电站扩机与不扩机条件下年发电量

Fig. 4 Power generation of the Taohe River cascade hydropower stations under the condition of water transferring in the first phase of the Western Route of the South-to-North Water Transfers Project

由图 4 可以看出,洮河梯级水电站调水前综合年发电量 24.35 亿 kW·h;在南水北调西线一期上下线组合调水和下线调水方案中,不同调水模式下的发电量较调水前均有大幅提升。

不扩机情况下:①上下线组合调水方案。洮河梯级水电站均匀调水模式综合年发电量 46.05 亿 kW·h,年增发电量 21.70 亿 kW·h,增幅为 89.12%;洮河梯级水电站丰多枯少调水模式综合年发电量 42.52 亿 kW·h,年增发电量 18.17 亿 kW·h,增幅为 74.62%。②下线调水方案。洮河梯级水电站均匀调水模式综合年发电量 51.36 亿 kW·h,年增发电量 27.01 亿 kW·h,增幅为 110.92%;洮河梯级水电站丰多枯少调水模

式综合年发电量 49.83 亿 kW·h,年增发电量 25.48 亿 kW·h,增幅为 104.64%。

扩机情况下:①上下线组合调水方案。洮河梯级水电站均匀调水模式综合年发电量 49.95 亿 kW·h,年增发电量 25.60 亿 kW·h,增幅为 105.13%;洮河梯级水电站丰多枯少调水模式综合年发电量 49.16 亿 kW·h,年增发电量 24.81 亿 kW·h,增幅为 101.89%。②下线调水方案。洮河梯级水电站均匀调水模式综合年发电量 71.80 亿 kW·h,年增发电量 47.45 亿 kW·h,增幅为 194.87%;洮河梯级水电站丰多枯少调水模式综合年发电量 71.32 亿 kW·h,年增发电量 46.97 亿 kW·h,增幅为 192.90%。

综上所述,南水北调西线一期上下线组合调水和下线调水方案中,无论是在扩机还是不扩机情况下,均匀调水模式在提升洮河梯级水电站发电效益方面均优于丰多枯少调水模式。

#### 4.3 洮河梯级水电站保证出力分析

由于水电站保证出力是水电站在长期工作中满足水电站设计保证率要求的供水期的平均出力,在水电站规划阶段,为减少工作量,通常可采用设计

代表年法计算水电站保证出力。因此,在考虑南水北调西线一期工程调水后洮河梯级水电站扩机的基础上,以洮河设计保证率(90%)下的来水过程作为模型输入,通过求解洮河梯级水电站保证出力计算模型,南水北调西线一期工程不同调水方案、不同调水模式下的洮河梯级水电站保证出力情况见图5。

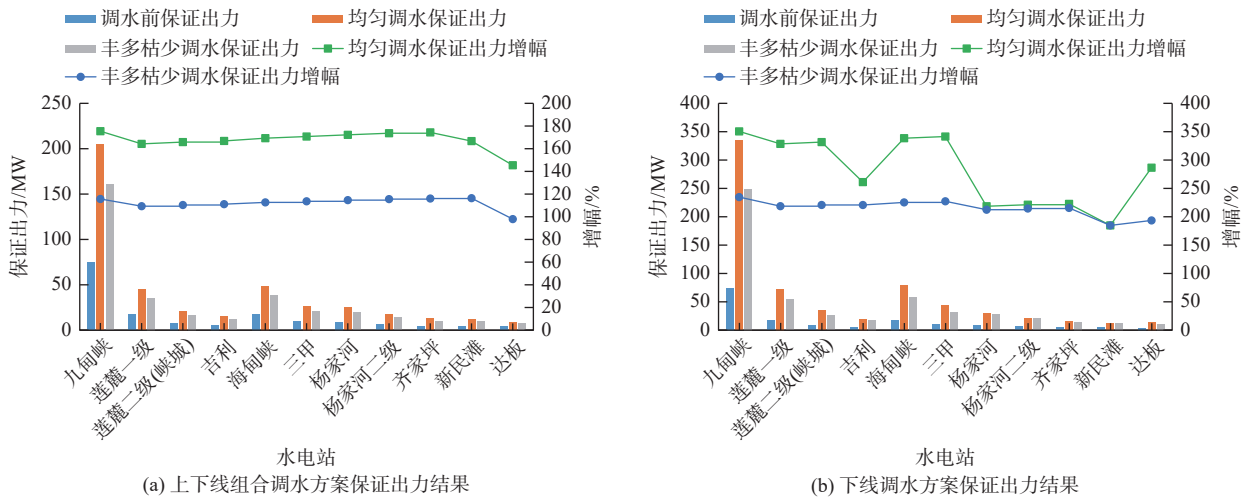


图5 南水北调西线一期调水条件下洮河梯级水电站保证出力

Fig. 5 Guaranteed power generation of the Taohé River cascade hydropower station under the condition of water transferring in the first phase of the Western Route of the South-to-North Water Transfers Project

由图5可以看出:在南水北调西线一期上下线组合调水方案中,不同调水模式下的保证出力较调水前均有大幅提升。在均匀调水模式下,洮河梯级水电站保证出力增加值为275.85 MW,增幅为171.30%;在丰多枯少调水模式下,洮河梯级水电站保证出力增加值为183.08 MW,增幅为113.69%。这表明均匀调水模式较丰多枯少调水模式更有利于提升洮河梯级水电站的发电调度运行。在南水北调西线一期下线调水方案中,不同调水模式下的保证出力较调水前同样有大幅提升。在均匀调水模式下,洮河梯级水电站保证出力增加值为515.26 MW,增幅为319.96%;在丰多枯少调水模式下,洮河梯级水电站保证出力增加值为362.96 MW,增幅为225.39%。这表明均匀调水模式在提升洮河梯级水电站的发电调度中略优于丰多枯少调水模式。

## 5 结论

本文针对南水北调西线一期工程上下线组合调水方案、下线调水方案,通过构建梯级水电站发电量最大调度模型和梯级水电站保证出力计算模型,分析了南水北调西线一期工程不同调水方案、不同

调水模式对洮河梯级水电站的发电影响,得出结论如下:

南水北调西线一期工程调水可大幅增加洮河梯级水电站的扩机潜力,在不改变水电站装机利用小时数的情况下,其均匀调水模式中的上下线组合调水方案和下线调水方案可分别将洮河梯级水电站装机规模提升至1 128.62 MW和1 642.12 MW,其丰多枯少调水模式可分别将洮河梯级水电站装机规模提升至1 109.12 MW和1 603.62 MW。

在分别考虑南水北调西线一期工程调水洮河梯级水电站不扩机与扩机的前提下,南水北调西线一期工程均匀调水模式中的上下线组合调水方案和下线调水方案可分别将洮河梯级水电站不扩机与扩机年发电量提升89.12%和110.92%、105.13%和194.87%,南水北调西线一期工程丰多枯少调水模式可分别将洮河梯级水电站不扩机与扩机年发电量提升74.62%和104.64%、101.89%和192.90%。

在考虑南水北调西线一期工程调水洮河梯级水电站扩机的前提下,南水北调西线一期工程均匀调水模式中的上下线组合调水方案和下线调水方案可分别将洮河梯级水电站保证出力提升171.30%



和319.96%,南水北调西线一期工程丰多枯少调水模式可分别将洮河梯级水电站保证出力提升113.69%和225.39%。

南水北调西线工程调水可显著增加洮河梯级水电发电效益,其中基于下线调水方案的增加值约为上下线组合调水方案的2倍;南水北调西线一期工程在同一调水方案(上下线组合调水方案或下线调水方案)下,均匀调水模式相较丰多枯少调水模式在提升洮河梯级水电站发电效益方面具有更大优势。

#### 参考文献:

- [1] 赵勇,王浩,邓铭江,等.黄河几字弯水网:南水北调西线配套东延工程构想[J].水利学报,2023,54(9):1015-1024. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20220393.
- [2] 张金良,谢遵党,左琪.南水北调西线工程综合开发的筹融资模式[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1041-1048. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0123.
- [3] 李庆国,郭兵托,段高云,等.南水北调西线一期工程对黄河梯级发电作用分析[J].水力发电,2020,46(2):90-92. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2020.02.019.
- [4] 张金良,马新忠,景来红,等.南水北调西线工程方案优化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):109-114. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0098.
- [5] 聂常山,赵宇瑶,王延红.南水北调西线一期工程效益分析[J].人民黄河,2020,42(6):120-124. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.06.024.
- [6] 席海洋,陈克恭,鱼腾飞,等.南水北调西线一期工程调水新增水资源利用[J].中国沙漠,2021,41(4):158-166. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00044.
- [7] 张金良,景来红,唐梅英,等.南水北调西线工程调水方案研究[J].人民黄河,2021,43(9):9-13. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.09.002.
- [8] 王煜,周翔南,彭少明,等.基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置[J].水科学进展,2023,34(3):336-348. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.002.
- [9] 李福生,彭少明,李克飞,等.南水北调西线工程受水区缺水形势研究[J].人民黄河,2023,45(5):19-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.05.005.
- [10] 杨立彬,崔长勇,贺丽媛,等.南水北调西线工程受水区节水潜力研究[J].人民黄河,2023,45(5):13-18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.05.004.
- [11] 张金良,李福生,唐梅英,等.南水北调西线工程下线调水方案沿革及研究[J].人民黄河,2023,45(5):9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.05.003.
- [12] 景来红,李福生,崔荃,等.南水北调西线工程上线调水方案沿革及研究[J].人民黄河,2023,45(5):6-8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.05.002.
- [13] 张金良,景来红,李福生,等.南水北调西线工程总体布局及一期工程方案研究[J].人民黄河,2023,45(5):1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.05.001.
- [14] 徐金英,胡明庭.年调节水电站保证出力复核计算研究[J].中国水运(下半月),2020,20(8):103-104. DOI: CNKI:SUN:ZSUX.0.2020-08-046.
- [15] 王进,赵志鹏,程春田,等.耦合出力破坏深度与弃电准则的梯级水风光互补调度规则研究[J].水利学报,2023,54(12):1415-1429. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20230302.
- [16] 宋天华,张权,乔一帆,等.黑山峡水利枢纽装机容量优化调整研究[J].人民黄河,2023,45(11):161-164. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.11.030.
- [17] 刘强,姚晨晨,陈天力,等.基于综合利用新形势的新安江水库调度方案优化研究[J].水力发电,2021,47(11):90-95. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.11.018.
- [18] 黄成剑,解阳阳,刘赛艳,等.基于等流量法缩减空间策略的水电站调度方法[J].水力发电学报,2021,40(3):84-95. DOI: 10.11660/slf-dxb.20210308.
- [19] 王康铭,宋昕熠.气候变化对水力发电影响研究进展[J].水利水电技术(中英文),2023(2):129-141. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.02.012.
- [20] 闫孟婷,黄炜斌,张天遥,等.基于JMI-CNN-LSTM耦合模型的梯级水电站间流量动态滞时关系[J].水利水电技术(中英文),2023,54(3):154-164. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.03.014.
- [21] 艾学山,郭佳俊,穆振宇,等.梯级水库群多目标优化调度模型及CPF-DPSA算法研究[J].水利学报,2023,54(1):68-78. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20210947.
- [22] 王何予,田晶,郭生练,等.考虑水文改变生态指标的丹江口水库多目标优化调度[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1041-1051. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0103.
- [23] 王翌旭,刘强,钟平安,等.低调节性能水库防洪优化调度分段试算法改进[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):598-605. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0063.
- [24] FANG G H, WU C J, LIAO T, et al. A two-layer improved invasive weed optimization algorithm for optimal operation of cascade reservoirs[J]. Water Supply, 2020, 20(6): 2311-2323. DOI: 10.2166/ws.2020.140.
- [25] WU C J, FANG G H, LIAO T, et al. Integrated software development and case studies for optimal oper-



ation of cascade reservoir within the environmental flow constraints[J]. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4064. DOI: [10.3390/su12104064](https://doi.org/10.3390/su12104064).

[26] 乔文. 主动配电网中固态变压器优化配置研究[D]. 天津: 天津大学, 2019. DOI: [10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.003859](https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.003859).

## **Influence of water transferring from the Western Route of South-to-North Water Transfers Project on power generation of the cascade hydropower stations in the Taohe River**

LIU Hongxin<sup>1</sup>, WANG Limei<sup>1</sup>, WU Chengjun<sup>2,3</sup>

( 1. School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 3. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China )

**Abstract:** The Western Route of South-to-North Water Transfers Project is a major strategic infrastructure in the national "four horizontal and three vertical" water resources allocation pattern, diverting water from the upper reaches of the Yangtze River into the Yellow River. In 2020, the *Comparison and Demonstration of Planning Schemes for the Western Route of South-to-North Water Transfers Project* was examined and approved by the General Institute of Water Planning of the Ministry of Water Resources, and following schemes were formulated: the upper route (UR), the upper and lower combination routes (ULR), and the lower route scheme (LR). The water diversion for the first phase of the Western Route Project is 8 billion m<sup>3</sup>.

Two water transfer processes were set up in each scheme to study the influence on power generation of the cascade hydropower stations in Taohe River based on the ULR and the LR schemes. At the same time a maximum power generation scheduling model and a guaranteed output calculation model of cascade hydropower stations were constructed. The two-layer improved invasive weeds optimization (TIWO) algorithm was used to solve the above models. Meanwhile, a method for assessing the expansion potential of the cascade hydropower stations was proposed.

The results showed that the expansion potential of cascade hydropower stations in the Taohe River was greatly enhanced by the first phase of the Western Route Project. The installed scale of the cascade hydropower stations in the Taohe River was increased to 1,128.62 MW and 1,642.12 MW, respectively, by the ULR and the LR schemes in the uniform water diversion mode, and to 1,109.12 MW and 1,603.62 MW respectively, by the rich and poor water diversion mode without altering the installed utilization hours of the hydropower stations. Considering the expansion potential of the cascade hydropower stations in the first phase of the West Route Project, the power generation of the cascade hydropower stations in the Taohe River was increased by 105.13% and 194.87% by the ULR and the LR schemes, and by 101.89% and 192.90% respectively by the water diversion scheme of the rich and poor water diversion mode. Considering the expansion of the cascade hydropower stations in the first phase of the West Route Project, the guaranteed output of the cascade hydropower stations in the Tao River was increased by 171.30% and 319.96% through the ULR and the LR schemes, and by 113.69% and 225.39% through the rich and poor water diversion mode.

The power generation efficiency of the cascade hydropower stations in the Taohe River is greatly increased by the water diversion of the Western Route Project, and the added value based on the LR scheme is approximately double that of the ULR scheme. Under the same water diversion scheme (the ULR scheme or the LR scheme) of the first phase of the Western Route Project, the uniform water diversion mode has comparatively more advantages than the rich and poor water diversion mode for improving the power generation efficiency of the cascade hydropower stations in the Taohe River.

**Key words:** Western Route of the South-to-North Water Transfers Project; Taohe River; cascade hydropower station; hydropower expansion; guaranteed output