

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.005

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:李天昊,汪妮,彭方旭.基于P-PSO-SA算法的调水区梯级水库发电影响模拟[J].西安理工大学学报,2026,42(2):197-205.

Li Tianhao, Wang Ni, Peng Fangxu. Simulation of power generation impact of cascade reservoirs in water diversion areas based on P-PSO-SA algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 197-205.

基于 P-PSO-SA 算法的调水区梯级水库发电影响模拟

李天昊¹, 汪妮^{1,2}, 彭方旭³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为评估引汉济渭调水工程对汉江下游梯级水库发电的复合影响,构建以发电量最大为目标函数,考虑生态流量约束、蒸散发及渗漏损失的水库优化调度模型,并耦合自适应惯性权重和模拟退火将粒子群优化(PSO)算法改进为 P-PSO-SA 算法,实现对模型的高效求解。结果表明,调水后石泉、喜河、安康三个水库 2000—2020 年间多年平均发电量分别减少 21.98%、16.29%、12.21%,且发电损失随距调水区距离的增加呈现递减趋势。通过对比代表丰、平、枯水年的年内径流和发电量变化,发现调水后梯级水库发电在冬季和枯水年夏季形成电力供应缺口,与陕西省用电负荷峰值存在时空错位。研究可为科学分析跨流域调水工程对下游梯级水库径流及发电的影响提供参考。

关键词: 梯级水库; 优化调度; 混合粒子群算法; 发电影响; 引汉济渭调水工程

中图分类号: TV62

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)02-0197-9

Simulation of power generation impact of cascade reservoirs in water diversion areas based on P-PSO-SA algorithm

Li Tianhao¹, Wang Ni^{1,2}, Peng Fangxu³

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to evaluate the compound impact of the water diversion project from the Han River to the Wei River on the power generation of cascade reservoirs in the lower reaches of the Han River, a reservoir optimal operation model is constructed, which takes the maximum power generation as the objective function and considers the ecological flow constraints, evapotranspiration and leakage losses. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is improved to the P-PSO-SA algorithm by coupling the adaptive inertia weight and simulated annealing to achieve the efficient solution of the model. The results show that the average annual power generation of Shiquan, Xihe and Ankang reservoirs decreased by 21.98%, 16.29% and 12.21% respectively from 2000 to 2020 after the water transfer, and the power generation loss showed a decreasing trend with the increase of the distance from the water transfer area. By comparing the annual inner diameter flow and power generation changes of representative high, normal and low water years, it is found that the power generation of cascade reservoirs after water transfer forms a

收稿日期: 2024-12-02; 网络首发日期: 2025-05-19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250519.1339.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979221); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JLM-45)

第一作者: 李天昊,男,硕士生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:1257405950@qq.com

通信作者: 汪妮,女,博士,教授,博导,研究方向为水文及水资源。E-mail:wangni@xaut.edu.cn

power supply gap in winter and summer in low water years, which is of spatiotemporal dislocation with the peak value of power load in Shaanxi Province. The study provides a reference for the scientific analysis of the impact of inter basin water transfer project on the runoff and power generation of downstream cascade reservoirs.

Key words: cascade reservoirs; optimize scheduling; hybrid particle swarm optimization; impact of power generation; the water diversion project from Han River to Wei River

随着社会经济的发展,陕西关中地区的水资源供需矛盾越发突出,缺水问题已成为制约关中地区可持续发展的主要“瓶颈”。而陕西省修建的引汉济渭工程肩负着缓解关中平原缺水、保障其社会发展的重要任务^[1]。为实现引汉济渭工程对下游发电效益影响的最小化及水资源的高效利用,采用优化调度模型来分析工程运行对下游梯级水库的影响具有重要意义。

鉴于高维度、强非线性及多重耦合约束条件的水库优化调度问题对传统数学规划方法提出了严峻挑战,以启发式搜索为核心的智能优化算法凭借其并行计算效率及对复杂系统的适应性,逐渐成为求解优化调度问题的关键途径。国内外学者基于遗传算法(genetic algorithm, GA)^[2]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)^[3]、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)^[4]等经典智能优化算法进行了大量研究并取得了诸多成果。黄显峰等^[5]利用改进的 PSO 算法对山东费县水库群优化调度模型进行评估,发现优化调度模型能显著减轻下游水库的防洪压力并保障其安全运行。雷其鸣等^[6]构建了考虑发电-生态-供水多目标协同的水库优化调度模型,并通过改进强化学习算法进行求解,结果表明该算法具有优越的收敛精度和解集质量,可令水库群综合调度效益显著增加。陈虎等^[7]采用混合交叉算子的非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解优化调度模型,得到了更合理的水库优化调度方案。文献^[8]采用现代约束规划求解普密蓬水库优化调度模型,优化了水库综合管理效能。文献^[9]深入探讨了不同优化算法对水库优化调度模型的求解结果,并推导出水库最佳调度规则,提升了水库运行效率。丁文昌等^[10]引入蝙蝠算法运算梯级水电站的优化调度模型,探索了梯级水电站的最优调度策略。李淑敏等^[11]采用改进沙猫群算法有效解决了水库群联合优化调度问题。Cui 等^[12]运用耦合优化算法(F-HGAPSO)有效避免了局部最优,提高了水库防洪蓄洪量的利用效率。

基于上述研究成果及方法,本文以引汉济渭工程下游的梯级水库为研究对象,利用自适应惯性权重和模拟退火算法(simulated annealing, SA)将

PSO 算法改进为 P-PSO-SA (particle swarm optimization base on mutative parameters and simulated annealing)算法。改进算法使 PSO 算法的惯性权重能跟随迭代过程自适应调整,避免算法在运行中过度偏向全局搜索或局部搜索,既增强了 PSO 算法的全局搜索能力,又避免了算法陷入局部最优。本文拟应用 P-PSO-SA 算法分析引汉济渭工程调水对下游梯级水库发电的影响,并对比调水后径流量与发电量的变化,旨在消减跨流域调水引发的负面效应,实现水能资源的优化配置,同时验证 P-PSO-SA 算法的有效性和优越性。

1 研究区概况、调水策略与水库响应

1.1 研究区概况

汉江流域陕西段位于秦岭以南地区,属于亚热带季风气候,支流错综复杂,水系分布不对称。区域降水具有显著的季节性特征,夏季高温多雨,冬季低温少雨,年降水量在 800 mm 以上。汉江流域年均蒸发量在 610~990 mm 之间,不同地区的蒸发量受气候和地形影响存在差异,南北高山区域蒸发量较小,而川道盆地蒸发量较大。流域径流量呈南多北少、山地多、川道与盆地少的特征,年径流深在 300~850 mm,呈自东南向西北递减的趋势。汉江流域陕西段概况图及主要水库、水文站的分布见图 1。

1.2 调水策略与水库响应

根据《陕西省引汉济渭工程总设计报告》,引汉济渭工程 2025 年设计调水量为 10 亿 m³。规划在工程建成后,三河口水库水位在防弃水线之上时,三河口水库优先调水;三河口水库水位在防弃水线与死水位之间时,黄金峡水库和三河口水库联合供水,黄金峡水库优先调水,多余水量进入三河口水库存蓄。

调水区下游的四座梯级水库中,蜀河水库控制的流域面积较大、河道支流众多,且该水库距调水区较远,区间入流补给和距离因素的双重作用弱化了调水对蜀河水库的影响。同时,安康水库作为季调节水库,拥有较强的调节能力,进一步缓解了调水对蜀河水库的影响。因此,选取石泉水库、喜河水库、安康水库三个水库作为研究对象,分析引汉济渭工程调水后,梯级水库的径流量与发电量变化。

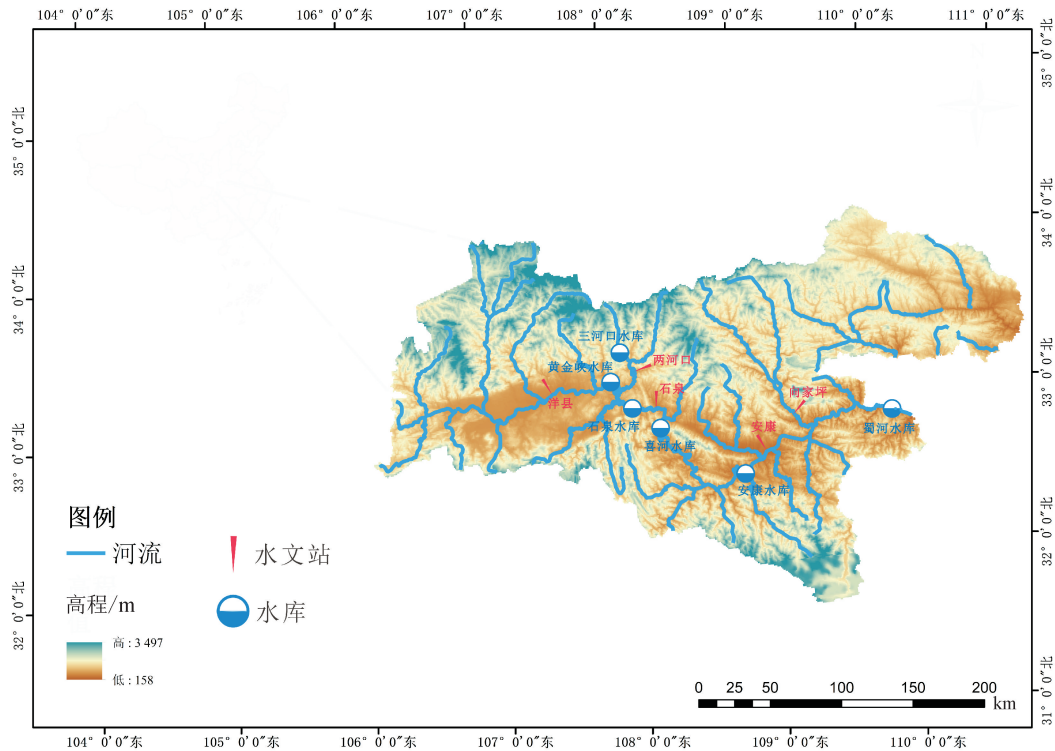


图 1 汉江流域陕西段及主要水库和水文站分布概况图

Fig. 1 Distribution of main reservoirs and hydrological stations in Shaanxi section of Hanjiang River Basin
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作,底图无修改。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

经突变性检验,洋县水文站与两河口水文站流量资料的突变点分别位于 1996—1997 年间、1982—1983 年间;两个水文站 2000—2020 年的多年平均流量与 1967—2020 年的多年平均流量差异均小于 5%,表明 2000—2020 年的流量资料能够反映长期水文规律。而且引汉济渭工程于 2014 年进入全面

实施阶段,2023 年 7 月正式向西安通水,为避免早期数据因气候变化和人类活动对结果造成干扰,选取 2000—2020 年洋县水文站和两河口水文站流量资料,采用水文比拟法推测黄金峡水库和三河口水库的入库径流。再通过 2000—2020 年石泉水文站和安康水文站的多年径流资料计算引汉济渭工程下游石泉水库、喜河水库和安康水库间的区间入流和入库径流。水利工程概化及数据处理流程如图 2 所示。

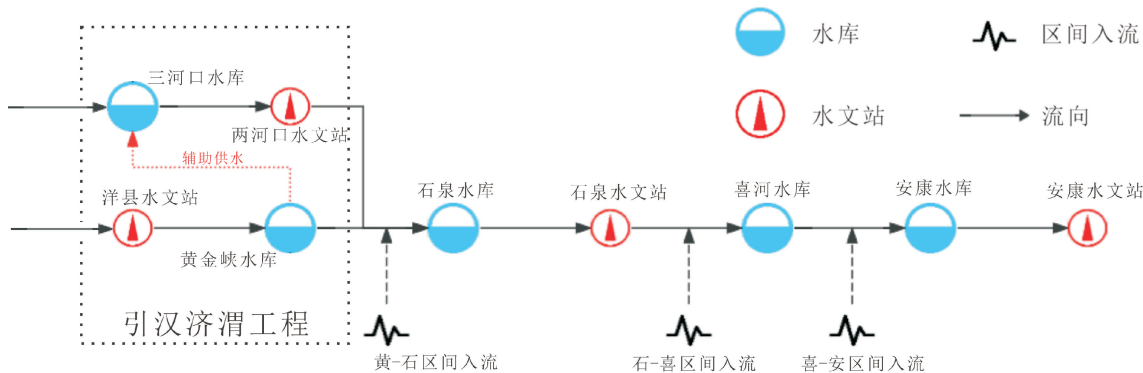


图 2 水利工程概化及数据处理流程图

Fig. 2 Overview and data processing flow chart of water conservancy engineering

2.2 研究方法

2.2.1 基于自适应惯性权重的 PSO

粒子群算法,也称粒子群优化算法(PSO),其思

想源于对鸟群觅食行为的模拟,由 Kennedy 和 Eberhart^[13]于 1995 年首次提出,该算法计算简便、操作容易、收敛速度快,不需要调节过多参数,且全

局搜索能力强,在函数优化、模式分类、模型模拟等领域都得到了广泛应用。

在 PSO 算法中常将惯性权重设为定值,但随着迭代次数的增加,惯性权重可能产生一定偏差,导致算法在迭代过程中偏向局部或全局搜索^[14]。对此,将 PSO 算法中的常数惯性权重更改为自适应惯性权重,形成改进粒子群算法(particle swarm optimization base on mutative parameters, P-PSO)。其惯性权重为:

$$w(t) = (w_1 - w_2) \tan \left\{ 0.875 \left[1 - \left(\frac{t}{n} \right)^k \right] \right\} + w_2 \quad (1)$$

式中: w_1 为初始惯性权重,取经验值 0.9; w_2 为终止惯性权重,取经验值 0.4^[15]; t 为粒子当前迭代次数; n 为粒子的最大迭代次数; k 为控制因子,用于控制惯性权重 w 的大小。

2.2.2 混合粒子群算法

P-PSO 算法虽解决了 PSO 算法在迭代过程中易偏向局部或全局搜索的问题,但算法在寻优过程中仍会只接受一些局部最优解而抛弃相对较差解,造成算法无法跳出局部最优,使结果产生一定误差,降低了算法精度。对此,引入模拟退火算法(SA)的 Metropolis 准则,将 P-PSO 算法改进成混合粒子群算法(P-PSO-SA)。改进步骤如下。

1) 在 P-PSO 算法的初始参数中加入温度 T_0 ,设置当前温度 $T = T_0$,再把粒子当前位置记为 x_i ,并计算相应的适应度值 $f(x_i)$ 。

2) 记当前粒子的局部最优值为 p_{Best} ,计算相应的适应度值 $f(p_{\text{Best}})$ 。

3) 计算解的变化量 $\Delta f = f(p_{\text{Best}}) - f(x_i)$ 。

4) 如果 $\Delta f < 0$,则接受 x_i 为当前最优解;否则计算 x_i 的接受概率 $p = \exp(-\Delta f / T)$ 。如果 $\exp(-\Delta f / T) > \text{rand}(0, 1)$,那么同样可接受 x_i 为新的当前最优解;否则接受 p_{Best} 为当前最优解。

5) 满足迭代终止条件后(达到最大迭代次数;达到终止温度;最优值在若干次迭代中保持不变),输出最优解,否则按衰减函数($T_n = \alpha \times T_{n-1}$, α 取 0.95^[14])降低 T 后回到步骤 3)继续进行迭代。

P-PSO-SA 算法在当前温度为 T 时,能以一定概率 p 接受非最优解,从而有效避免 PSO 算法陷入局部最优^[16]。概率 p 为:

$$p = \begin{cases} 1, & \Delta f \leq 0 \\ \exp(-\frac{\Delta f}{T}), & \Delta f > 0 \end{cases} \quad (2)$$

3 模型的建立及参数设置

在引汉济渭工程调水区下游梯级水库中,石泉和安康水库为季调节水库,喜河和蜀河水库为日调节水库。其中,蜀河水库距离引汉济渭工程调水区很远,且河道支流众多,加之蜀河水库控制的流域面积很大,水库入库径流也大,使得引汉济渭工程调水对蜀河水库的影响十分微小。因此,本文主要研究石泉、喜河、安康三个梯级水库受调水的影响情况。

3.1 目标函数

梯级水库优化调度模型的目标函数为:

$$O_b = \max \sum_{i \in T} \sum_{i \in M} k_i \bar{h}_i(t) QF_i(t) \times \Delta t \quad (3)$$

式中: T 为计算周期总时段数; M 为水库总数; k_i 为第 i 个水库的出力系数; $\bar{h}_i(t)$ 为第 t 时段第 i 个水库的平均水头; $QF_i(t)$ 为第 t 时段第 i 个水库的发电流量; Δt 为时段长。

3.2 约束条件

1) 水量平衡约束

$$V_i(t) = V_i(t-1) + \Delta t(\alpha_{i-1} Q_{i-1}(t) + QR_i(t) - QF_i(t) - QS_i(t)) \quad (4)$$

式中: $V_i(t)$ 为第 t 时段第 i 个水库的库容; $V_i(t-1)$ 为第 $t-1$ 时段末第 i 个水库的库容; $QR_i(t)$ 为第 t 时段第 i 个水库的区间入流量; $Q_{i-1}(t)$ 为第 t 时段第 $i-1$ 个水库的下泄量; $QF_i(t)$ 为第 t 时段第 i 个水库的发电流量; $QS_i(t)$ 为第 t 时段第 i 个水库的弃水及损失流量; α_{i-1} 为第 $i-1$ 个水库到第 i 个水库的沿程水量损失系数。

2) 出力约束

$$\underline{N}_i(t) \leq N_i(t) \leq \overline{N}_i(t) \quad (5)$$

式中: $\underline{N}_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 内的最小出力约束; $\overline{N}_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 内的最大出力约束。

3) 水位约束

$$\underline{H}_i(t) \leq H_i(t) \leq \overline{H}_i(t) \quad (6)$$

式中: $\underline{H}_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 末的下限水位约束; $\overline{H}_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 末的上限水位约束。

4) 流量约束

$$\underline{QF}_i \leq QF_i(t) \leq \overline{QF}_i \quad (7)$$

$$QF_i(t) + QS_i(t) \geq \underline{Q}_i(t) \quad (8)$$

式中: $\underline{Q}_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 内的综合利用要求下限; $\underline{QF}_i$ 为水库 i 水轮机的最小过机流量; $\overline{QF}_i$ 为水库 i 水轮机的最大过机流量。

3.3 参数设置

以发电量最大为适应度函数,分别运用 PSO 算法、P-PSO 算法、P-PSO-SA 算法对水库优化调度模型进行求解。三种算法的种群规模均为 200,最大迭代次数均取 500 次,学习因子 c_1 和 c_2 均为 1.5 和 2.0。采用 P-PSO-SA 算法进行求解时,为使算法更稳定,同时具有较快的收敛速度,经过多次模拟调试,最终确定控制因子 $k = 0.6$,初始退火温度 $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模型的参数设置如表 1 所示。

表 1 P-PSO-SA 算法的参数设置表

Tab. 1 Parameter setting table of P-PSO-SA algorithm

参数名称	取值
粒子种群大小 M	200
最大迭代次数 $n/\text{次}$	500
惯性权重的阻尼比	0.99
学习因子 c_1	1.5
学习因子 c_2	2.0
粒子飞行时的速度最大值 $v_{\max}$	$0.1 \times (v_{\max} - v_{\min})$
粒子飞行时的速度最小值 $v_{\min}$	$-v_{\max}$
汛期的时段数/个	3
初始惯性权重 w_1	0.9
终止惯性权重 w_2	0.4
控制因子 k	0.6
初始退火温度 $T_0 / ^{\circ}\text{C}$	500

4 模型求解及结果分析

4.1 模型求解

黄金峡水库下泄生态流量为 $25\text{ m}^3/\text{s}$,三河口水库下泄生态流量为 $2.71\text{ m}^3/\text{s}$,当调水后水库来水量小于下泄生态流量时,来水全部下泄以满足河道基本生态要求。由于黄金峡水库和三河口水库坝址处均无实测水面蒸发资料,两个水库的蒸发及渗漏损失总量按水库时段蓄水量的 5% 计算^[17]。记录三种算法的迭代过程,见图 3。

由图 3 可知,PSO 算法经过 377 次迭代找到最优适应度值 37.778,而 P-PSO 和 P-PSO-SA 算法分别经过 82 次和 10 次迭代后就已发现更优的适应度

值,分别为 38.365 和 39.408。表明 P-PSO-SA 算法具有优越的全局搜索能力和更快的收敛速度,相比 PSO 和 P-PSO 算法,其局部最优得到有效抑制,证明了改进方法的可行性。

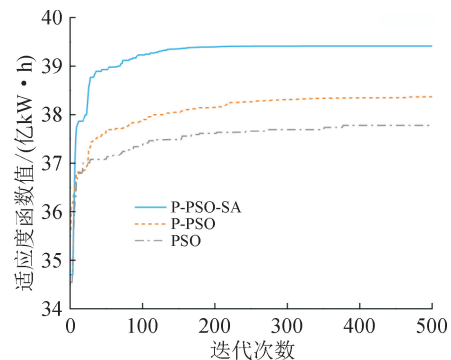


图 3 PSO、P-PSO 和 P-PSO-SA 算法的进化过程对比图

Fig. 3 Evolution process comparison diagram of PSO, P-PSO and P-PSO-SA algorithm

4.2 结果分析

4.2.1 发电量年际影响分析

用 P-PSO-SA 算法计算得到引汉济渭工程调水前后石泉水库、喜河水库和安康水库的多年平均入库径流、下泄流量和发电量变化,分别如图 4 至图 6 所示。

计算得出,水库多年平均发电流量与多年平均入库径流的减少基本同步,减少比例差量不超过 2.5%,存在这种差异是因为水库来水量较多,且时间分布不均,水库库容不能容纳全部来水。

由上述对比图可以看出,调水后三个梯级水库多年平均下泄流量分别减少 20.77%、19.28%、13.59%。多年平均发电量分别为 5.75 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、4.42 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、21.85 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,与调水前相比,石泉水库多年平均发电量减少 1.62 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,喜河水库减少 0.86 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,安康水库减少 3.04 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,减少比例分别为 21.98%、16.29%、12.21%。下泄流量与发电量的减小比例均表现出递减趋势,表明水库距离调水区越远,受调水工程的影响越小(石泉水库 > 喜河水库 > 安康水库)。

4.2.2 发电量年内影响分析

选取对水利工程不利的 2006 年作为代表枯水年,2017 年作为代表平水年,2011 年作为代表丰水年,分析引汉济渭工程运行对调水区梯级水库发电的年内影响。图 7 为黄金峡及三河口水库年内总入库径流变化。

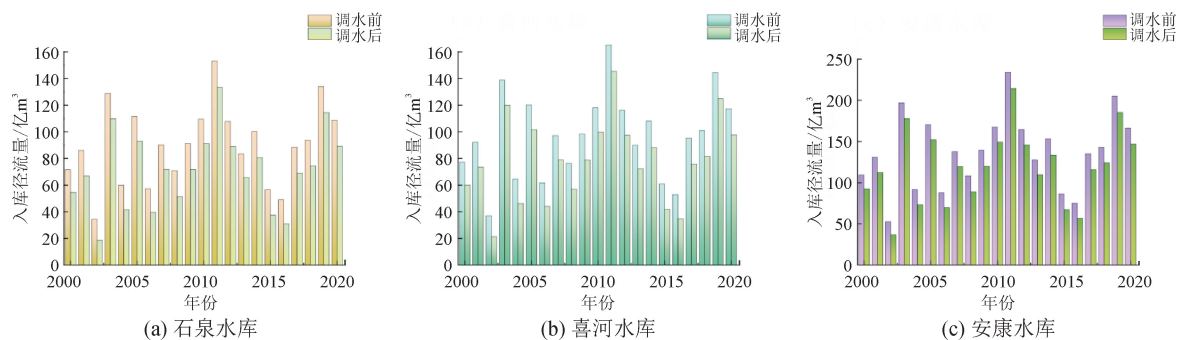


图 4 石泉、喜河、安康水库调水前后年平均入库径流对比图

Fig. 4 Comparison of annual average inflow runoffs before and after water diversion in Shiquan, Xihe and Ankang reservoirs

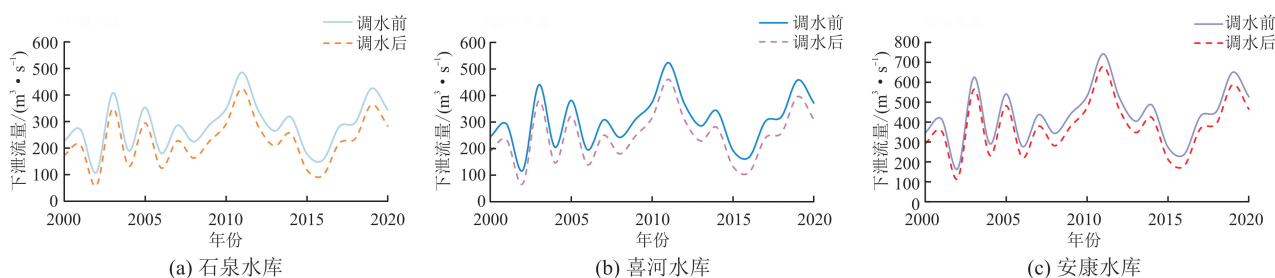


图 5 石泉、喜河、安康水库调水前后年平均下泄流量对比图

Fig. 5 Comparison of annual average discharges before and after water diversion of Shiquan, Xihe and Ankang reservoirs

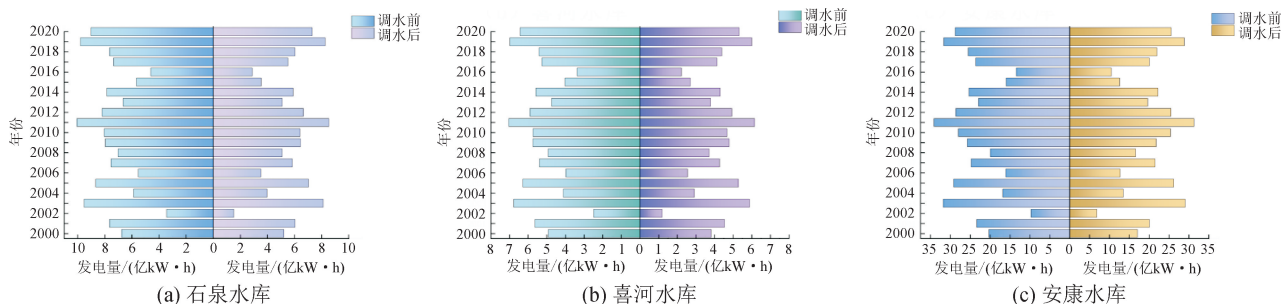


图 6 石泉、喜河、安康水库调水前后年发电量对比图

Fig. 6 Comparison of annual power generations before and after water diversion in Shiquan, Xihe and Ankang reservoirs

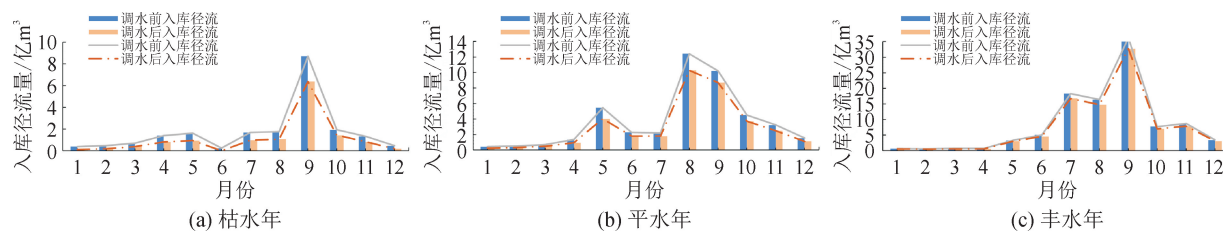


图 7 黄金峡及三河口水库枯水年、平水年、丰水年年内总入库径流变化图

Fig. 7 Variation in total inflow runoff of Huangjinxia and Sanhekou reservoirs during dry year, normal year and wet year

在图 7(a)中,枯水年 6 月调水后的总来水量小于生态流量下泄需求,此时来水全部下泄以维持河道基本生态功能,入库径流为 0;在枯水年其它月份中,调水后 1 月径流量减少比例最大,减少了 72.16%;10 月减少比例最小,减少了 25.44%;汛期(7~9 月)径流量减少 30.63%。平水年调水后 1 月径流量减少比例最大,为 45.03%;9 月减少比例最

小,为 14.70%;汛期径流量减少 16.27%(见图 7(b))。丰水年调水后 2 月径流量减少比例最大,为 18.75%;7 月减少比例最小,为 8.73%;汛期径流量减少 9.48%(见图 7(c))。通过上述数据可以发现,调水对入库径流的影响在枯水年(较平水年)最大,在丰水年最小,且入库径流减小比例均在 1~2 月最大。

由于每年的调水总量是固定的,来水较多的月

份调水量较大,来水少的月份调水量相应减少,保证入库径流极值不会过小或过大,减小了各月间入库径流的变化幅度,使其在年内的变化更加均匀,分配更加合理。

喜河水库和安康水库通过自身调节能力和区间

入流来补充水量,能有效减小工程调水带来的影响。石泉水库作为引汉济渭工程下游第一个梯级水库,其区间入流比喜河、安康水库少,受调水工程影响显著,因此,以石泉水库为例,分析其调水前后发电量的年内变化,如图 8 所示。

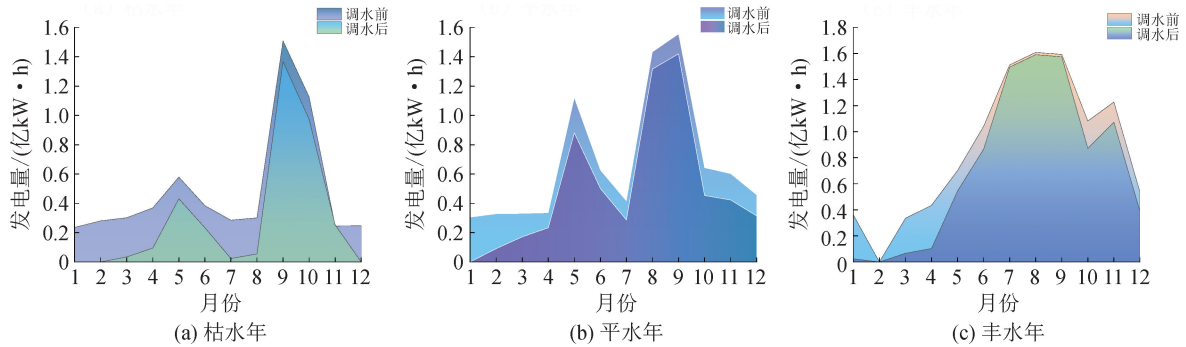


图 8 石泉水库枯水年、平水年、丰水年年内发电量变化图

Fig. 8 Changes in annual power generation during dry, normal, and wet years of Shiquan reservoirs

由图 8 可知,在枯水年,引汉济渭工程调水对石泉水库发电影响较大,致其多个月份发电量低下,汛期(7~9 月)虽发电量较多,但与调水前相比仍下降 30.99%;年发电量下降 41.29%。在平水年,调水对石泉水库发电的影响有所减小,汛期发电量下降 11.17%,相比枯水年降低了 19.82%;年发电量减少 25.22%,相比枯水年降低了 16.07%。在丰水年,调水对发电的影响明显减小,汛期发电量下降 1.13%,相比枯水年降低 29.86%,相比平水年降低 10.04%;年发电量减少 17.57%,相比枯水年降低 23.72%,相比平水年降低 7.65%。调水后枯水年 9 月发电量最大,为 1.37 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全年的 39.44%;汛期发电量为 1.45 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全年的 41.71%。平水年 9 月发电量最大,为 1.42 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全年的 23.31%;汛期发电量为 3.02 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全年的 49.63%。丰水年 8 月发电量最大,为 1.59 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全年的 18.50%;汛期发电量为 4.66 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全年的 54.19%。

2023 年陕西省火力发电占比 87.03%,水力发电占比 4.45%,太阳能发电占比 3.23%,风力发电占比 5.3%,全省的发电量主要来自火力发电,缺失的水力发电量不会影响陕西省的能源结构。在一年中陕西省冬季用电量最大,峰值出现在 12 月或 1 月;夏季次之,次峰值出现在 7 月或 8 月;春秋季节最少,用电量低谷出现在 5 月和 10 月^[18]。结合径流量和发电量的年内分配,发现冬季用电量出现峰值时,河道径流量很小,水库发电量也很小,电力调度中心会采用其它方式发电以满足用电需求;其中,如果冬季用电峰值出现在 12 月,调水后枯水年对用电

需求贡献微小,平水年和丰水年能满足一部分用电需求;如果冬季用电峰值出现在 1 月,调水后不论枯水年、平水年还是丰水年,水库发电都远远小于该月的用电需求,此时主要靠火力发电供应用电需求。夏季用电量峰值出现时正处于汛期,径流量较大,调水在枯水年对夏季发电有一定影响,在平水年影响轻微,在丰水年影响更小,可以多进行水力发电,减少火力发电,降低对火电的依赖。调水对春秋季发电的影响并不显著,可以相应减少火力发电,以节约资源。但能够看出,当用电量出现峰值时,调水后的径流量和发电量都比较小,而径流量和发电量出现峰值时,用电量峰值还未出现或已错过,这会造成资源浪费,需要优化资源配置,以提高资源利用率。

4.2.3 经济损失及用水收入分析

在引汉济渭工程受水区测算得到居民用水最高水价为 8.26 元/ m^3 ,非居民和特种行业用水平均水价为 12.86 元/ m^3 ^[19]。由于本文未对用水人员进行区分,故采用二者的平均值来计算受水区的用水收入。石泉水库上网电价为 0.25 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[20],喜河水库上网电价为 0.313 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[21],安康水库上网电价为 0.251 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[22]。由此,计算得到引汉济渭工程受水区多年平均用水收入为 104.97 亿元,3 个水库多年平均发电收入损失为 1.58 亿元。《陕西省引汉济渭工程总设计报告》指出,引汉济渭工程 2025 年的年运行费为 4.06 亿元,2030 年的年运行费为 4.92 亿元,环境保护专项投资 3.02 亿元,水土保持投资 3.25 亿元,安全专项投资 0.37 亿元。下游河道多年平均生态水资源价值损失为 2.20 亿元^[23]。这些费用及损失若能用水

区的用水收入来弥补,表明引汉济渭工程的运行对调水区下游区域的影响处于可接受范围内,不会破坏下游区域的可持续发展;若用水收入远高于发电收入损失与各项支出,则表明引汉济渭工程短期经济效益较高,需警惕生态成本累积风险。

5 讨 论

本文运用 P-PSO-SA 算法分析了引汉济渭工程对下游梯级水库发电量的影响,结果表明,石泉、喜河、安康水库多年平均发电量分别减少 21.98%、16.29%、12.21%,呈现出显著的梯度递减规律。这一现象主要是地理位置、库容差异及区间入流补偿共同作用的结果。石泉水库作为下游梯级水库的首个水库,区间入流远小于安康水库,且受限于水库库容,枯水年 1 月发电量骤降;而安康水库因存在区间入流补给,其发电对径流变化的响应更趋平缓。与曹正浩等^[24]的研究相比,本研究因计入管道渗漏损失及更新的水文序列(2000—2020 年),能更真实地反映用水需求增长与发电之间的关系,但二者均验证了调水影响随距离衰减的普适性;李万绪^[25]在汉江径流研究中指出石泉水库径流量减少了 19%,这与本研究所得出的发电量降幅基本吻合,进一步验证了模型的可靠性。

为满足河道生态需求,石泉水库下泄流量不得小于 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[26],安康水库下泄流量不得小于 $57.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[27],采用 Tennant 法估算喜—安河道的生态流量,并将多年平均流量的 20%作为生态基流,得出喜河水库下泄流量不小于 $49.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据 P-PSO-SA 算法运算结果,石泉、喜河、安康 3 个水库调水后的多年平均下泄流量分别为 $225.61 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $247.73 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $376.22 \text{ m}^3/\text{s}$,能够契合各河道的生态规范。

细化用水分类能提高用水收入估算的精确度^[5];生态成本核算考虑了调水对生态环境的潜在影响,更全面地评估了工程的生态成本^[24];开展长期经济效益评估能了解调水工程对经济发展、产业结构调整等方面的长期影响,为工程运行管理提供科学依据^[7]。本研究在分析引汉济渭工程调水所产生的经济损失与用水收入的影响时,存在一定局限性,后续为进一步完善经济分析,将细化用水分类、完善生态成本核算、开展长期经济效益评估等工作,并考虑水资源利用的不同方案。

6 结 论

1) 本文的 P-PSO-SA 算法,有效克服了传统 PSO 算法的早熟收敛缺陷,与改进前相比,P-PSO-SA 算法在寻优过程中所需迭代次数更少,仅迭代

10 次即收敛至全局最优适应度值 39.408,验证了其收敛速度、精度及鲁棒性的全面提升。

2) 调水后石泉、喜河、安康三个水库多年平均发电量分别减少 21.98%、16.29%、12.21%,印证了水能资源损失随水力联系衰减而梯度递减的规律。各水库调水后下泄流量均超过河道生态需水阈值,表明调水工程未对生态平衡造成负面影响,保障了下游区域的生态可持续性。

3) 枯水年调水对下游梯级水库发电的影响较平水年和丰水年更为严重,其年发电量降幅分别为 41.29%、25.22%、17.57%,但火力发电仍是电力供应的主力,水电在电力系统中占比较小,不会改变电力供应系统的格局。此外,梯级水库的发电收入损失及引汉济渭工程各项投资成本之和远小于受水区的用水收入,对此可建立相应的补偿机制,进一步减小调水工程带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 王浩,刘家宏. 引汉济渭工程在国家水资源战略布局中的作用[J]. 中国水利, 2015(14): 47-50, 59.
Wang Hao, Liu Jiahong. Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project plays an important role in China strategy of water resources[J]. China Water Resources, 2015(14): 47-50, 59.
- [2] 郑姣,杨侃,倪福全,等. 水库群发电优化调度遗传算法整体改进策略研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 205-211.
Zheng Jiao, Yang Kan, Ni Fuquan, et al. Research on overall improved genetic algorithm applied in optimal generation dispatching of multi-reservoir system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 205-211.
- [3] 张双虎,黄强,吴洪寿,等. 水电站水库优化调度的改进粒子群算法[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 1-5.
Zhang Shuanghu, Huang Qiang, Wu Hongshou, et al. A modified particle swarm optimizer for optimal operation of hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 1-5.
- [4] 徐刚,马光文,梁武湖,等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 397-400.
Xu Gang, Ma Guangwen, Liang Wuhu, et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 397-400.
- [5] 黄显峰,王浩天,高玉琴,等. 基于改进 PSO 算法的水库群防洪优化调度[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 203-212.
Huang Xianfeng, Wang Haotian, Gao Yuqin, et al. An enhanced PSO-based approach for optimizing the flood control operation of reservoir networks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 203-212.
- [6] 雷其鸣,牛庚,桑学锋,等. 基于改进强化学习算法的

- 水库群多目标优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(5): 1185-1195.
- Lei Qiming, Niu Geng, Sang Xuefeng, et al. Multi-objective optimal scheduling of reservoir group based on improved reinforcement learning algorithm [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(5): 1185-1195.
- [7] 陈虎,郭园,祝雪萍,等. 基于混合交叉算子改进 NS-GA-II 算法的董铺——大房郢水库优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2025, 43(1): 197-201.
- Chen Hu, Guo Yuan, Zhu Xueping, et al. Optimal scheduling of Dongpu-Dafangying Reservoir based on hybrid crossover operator improved NSGA-II algorithm[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(1): 197-201.
- [8] Sawangphol W, Krairangka J, Rittima A, et al. Constraint programming for reservoir operation optimization of Bhumibol dam [J]. Applied Water Science, 2024, 14(6):142.
- [9] Almubaidin M A, Ahmed A N, Sidek L M, et al. Deriving optimal operation rule for reservoir system using enhanced optimization algorithms[J]. Water Resources Management, 2024, 38(4): 1207-1223.
- [10] 丁文昌,雷晓辉,于卫彬. 基于蝙蝠算法的梯级水电站群优化调度研究[J]. 海河水利, 2024(7): 77-81, 90.
- Ding Wenchang, Lei Xiaohui, Yu Weibin. Optimal dispatching of cascaded hydropower stations based on bat algorithm[J]. Haihe Water Resources, 2024(7): 77-81, 90.
- [11] 李淑敏,冯丽云,陈海涛. 基于改进沙猫群算法的水库群防洪优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(12): 43-51.
- Li Shumin, Feng Liyun, Chen Haitao. Research on flood control optimization and scheduling of reservoir groups based on improved sand cat swarm algorithm [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(12): 43-51.
- [12] Cui Guangyun, Qi Zhen, Zhao Huaqing, et al. Application of F-HGAPSO algorithm in reservoir flood control optimal operation[J]. Water Resources Management, 2025, 39(4): 1763-1782.
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Icn95-International Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [14] 于桂芹,李刘东,袁永峰. 一种结合自适应惯性权重的混合粒子群算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(3): 49-53.
- Yu Guiqin, Li Liudong, Yuan Yongfeng. A hybrid particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(3): 49-53.
- [15] 金涛. PSO-SA 算法的改进及其在关联规则挖掘中的应用研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2013.
- Jin Tao. Improved PSO-SA algorithm and its application in association rules mining[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2013.
- [16] Alizamir S, Rebennack S, Pardalos P M. Improving the neighborhood selection strategy in simulated annealing using the optimal stopping problem[J]. Energy Systems, 2008: 363-382.
- [17] 张丽娟. 面向流域水资源的优化调度模式及可视化系统开发——以关中西部渭河北岸支流流域为例[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2004.
- Zhang Lijuan. Optical dispatch and visual program system for water resources in river region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004.
- [18] 蔡新玲,贺皓,李建科,等. 陕西省日用电量、最大负荷的气象预报模型[J]. 陕西气象, 2004(3): 40-42.
- [19] 葛雁. 引汉济渭工程供水价格初探[J]. 陕西水利, 2016(4): 13-16.
- [20] 洪华. 汉江调水工程对已建梯级水电站补偿方式探析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 100-103.
- Hong Hua. Discussions on compensation mode of the Hanjiang-to-Weihe Water Conveyance Project for cascade hydropower stations[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 100-103.
- [21] 钟丽. 规范的董事会运行管理机制成就企业可持续发展[J]. 西北水电, 2012(6): 8-10, 13.
- Zhong Li. Company sustainable development from operation and management mechanism of canonical board of directors[J]. Northwest Hydropower, 2012(6): 8-10, 13.
- [22] 王增利. 安康水电站节水增发电效益分析[J]. 水电厂自动化, 2013(1): 45-47.
- Wang Zengli. Benefit analysis of water-saving and power generation of Ankang Hydropower Station[J]. Automation of Hydropower Plant, 2013(1): 45-47.
- [23] 彭方旭. 引汉济渭工程对调水区的生态及发电效益影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023.
- Peng Fangxu. Study on the ecological and power generation benefits effects of the Hanjiang-to-Weihe River Water Transfers Project on the water transfer area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [24] 曹正浩,张娜,钱萍. 引汉济渭工程水资源论证[J]. 人民长江, 2014, 45(9): 30-33, 76.
- Cao Zhenghao, Zhang Na, Qian Ping. Water resource-sassessment on water diversion project from Hanjiang River to Weihe River[J]. Yangtze River, 2014, 45(9): 30-33, 76.
- [25] 李万绪. 引汉济渭工程对汉江干流水电站径流量和发电量影响的初步分析[J]. 西北水电, 2012(6): 18-21, 29.
- Li Wanxu. Analysis on affects by water transmission from Hanjiang River to Weihe River to runoff and power generation of hydropower station on main stream of Hanjiang River[J]. Northwest Hydropower, 2012(6): 18-21, 29.
- [26] 巩祥照. 汉江石泉水库控制断面生态基流的计算探讨[J]. 陕西水利, 2016(2): 101-102.
- [27] 王璞. 安康水电站水库生态优化调度研究[D]. 西安:西安理工大学, 2016.
- Wang Pu. Ecological optimization scheduling of Ankang hydropower station[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.

(责任编辑 周 蓓)