

基于时变耦合模型的引嘉入汉工程调蓄方案研究

魏娜¹, 卢昆明², 解建仓¹, 林梦珂¹, 王晨晖³

- (1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065
3. 济南市卧虎山水库管理处, 山东 济南 250115)

摘要: 针对复杂水资源系统具有的随机性和不确定性, 调水过程中存在调水区可调水过程和受水区需求过程匹配性差的问题, 以引嘉入汉工程为例, 开展基于时变耦合模型的引嘉入汉工程调蓄方案研究, 通过构建复杂水资源系统时变耦合模型, 设置调蓄方案集, 开展长系列逐旬调节计算及对比分析, 得到不同水平年引嘉入汉工程推荐调蓄方案和调蓄工程布局。结果表明: 2030 年工程采用下游调蓄, 调蓄节点为汉江主河道槽蓄和焦岩水库, 总调蓄库容为 1.5 亿 m³; 2040 年工程采用上下游联合调蓄, 调蓄节点为双庙崖水库和汉江主河道槽蓄, 总调蓄库容为 2.5 亿 m³, 为进一步优化引嘉入汉配水系统的总体格局和确保供水安全提供重要依据。

关键词: 时变耦合模型; 调蓄计算; 引嘉入汉工程

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2019)04-0420-07

Regulation and storage scheme of Jialing River to Hanjiang River water transfer project based on time-variant coupling model

WEI Na¹, LU Kunming², XIE Jianchang¹, LIN Mengke¹, WANG Chenhui³

- (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;
3. Management Department of Wohushan Reservoir in Jinan City, Jinan 250115, China)

Abstract: In terms of the mismatch problem between water transfer processes in water transfer area and water demand processes in water receiving area caused by the randomness and uncertainty of the complex water resources system, taking Jialing River to Hanjiang River water transfer project as an example, the paper focuses on the research of regulation and storage scheme of Jialing River to Hanjiang River water transfer project based on the time-variant coupling model. The time-variant coupling model of the complex water resources system is established, with the regulation and storage schemes set. The paper compares the results of long-term regulation and storage calculation every ten days under different schemes. The recommended regulation and storage schemes and project layout of Jialing River to Hanjiang River water transfer project for different level years are proposed. The results show that the project would adopt downstream storage in 2030 and upstream and downstream combined storage in 2040, with the total storage capacity of 150 million m³ and 250 million m³, respectively. The storage nodes would be the main channel storage and Jiaoyan reservoir of the Hanjiang River in 2030, Shuangmiaoya reservoir of the Jialing River and the main channel storage of the Hanjiang River in 2040, which provides an important basis for the further optimization of the overall pattern of Jialing River to Hanjiang River water distribution system, ensuring the water supply safety.

收稿日期: 2018-11-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709222); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401409); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JQ5076); 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(17JK0558); 西安理工大学人才引进资助项目(104-451016005, 2016ZZKT-21, 104-451116012)
作者简介: 魏娜, 女, 博士, 讲师, 研究方向为水利信息化与水库调度。E-mail: 844787598@qq.com
通讯作者: 解建仓, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为水利信息化。E-mail: jcxie@xaut.edu.cn

Key words: time-variant coupling model; regulation and storage calculation; Jialing River to Hanjiang River water transfer project

引汉济渭工程是解决陕西省关中地区缺水问题的骨干调水工程,工程近期多年平均调水量 10 亿 m^3 ,远期在国家南水北调中线后期水源工程建成后,多年平均调水量 15 亿 m^3 ^[1-2]。

目前,我国南水北调中线后续水源工程方案虽经多方初步研究,但由于工程任务艰巨,实施难度较大,加之涉及不同省份,不易协调,难以实现预期目标。为保证引汉济渭工程远期 15 亿 m^3 可调水量,保障陕西省特别是关中经济社会的可持续发展,需要寻找新的水源工程,满足引汉济渭工程补充水源的需求。

引嘉入汉工程从嘉陵江上游引水到汉江上游,是实现陕西省内嘉陵江、汉江、渭河水系连通,加强水资源统筹配置能力的重要措施^[3]。引嘉入汉工程建成以后,要充分发挥工程的供水能力,面临以下困难:

1) 引嘉入汉工程水源区与受水区丰枯同步的概率较大,调水供需过程在时间序列上匹配性差;

2) 引嘉入汉工程引水路线周围缺乏较好的建库条件,嘉陵江上游和汉江中上游无已建成的大型有利的调蓄水库,使得嘉陵江自流而下的水资源得不到有效调节。

因此,本研究重点探讨引嘉入汉配水工程的调蓄问题。

目前已完成的大型调水工程中,水资源调度运行和调蓄是两大核心内容。

美国加州的“北水南调”工程设计输水量为 52.2 亿 m^3/a ,实际调水量约为 40 亿 m^3/a ,共设置调蓄水库 29 座,总库容超过 80 亿 m^3 ,调蓄水库在整个工程中占据重要地位,典型的大型调蓄水库包括水源地的 Oroville 水库和配水工程中部的 SanLouis 水库,库容分别为 43.7 亿 m^3 和 25.2 亿 m^3 ^[4]。

我国南水北调中线工程作为跨流域长距离调水的特大型工程,其沿线无调蓄工程,对周边用户的供水安全极为不利。傅长锋等^[5-6]提出选用河北省徐水市瀑河水库作为中线上理想的在线调蓄工程,以保障调水工程顺利开展及沿线城镇的水资源安全。娄华君等^[7]提出将南水北调工程沿线和北京市区地下水漏斗区的空间库容纳入中线工程的水量调蓄管理系统,实现中线工程水量调蓄库容增加 38 亿 m^3 的目标。

相比之下,陕西省引汉济渭工程已建成的大型调蓄水库只有两座,即渠首的黄金峡水库和中部的三河口

水库,库容分别为 2.36 亿 m^3 和 6.8 亿 m^3 ,考虑到防洪要求,其水资源调蓄能力有限^[8-9]。刘家宏等^[10-12]探讨了引汉济渭配水工程调蓄研究的关键问题,得到不同频率年各调蓄节点的库容需求及工程布局。郑德凤等^[13-14]提出了地下水库调蓄能力的定义,建立了地下水库调蓄能力综合评价指标体系。张英贵^[15]运用径流式水电站上游水库的调蓄能力,建立了优化水库放水、蓄水过程的数学模型。

可以看出,调蓄工程在整个调水工程配水系统的运行管理中占据重要地位,当前对于调蓄工程的研究大多集中在规划及管理层面,对于系统中存在的实际问题,如调蓄工程总体布局及工程参数的确定,调蓄方案及运行管理机制等研究较少。

本文基于复杂水资源系统网络理论,为应对引嘉入汉工程可调水过程不均匀,供用水需求过程匹配性差等问题,以系统最佳平衡状态为目标,通过构建复杂水资源系统时变耦合模型和长系列逐旬调节计算及对比分析,提出近期 2030 年、中远期 2040 年引嘉入汉工程推荐调蓄方案和调蓄工程布局,为引嘉入汉工程配水系统的总体格局和确保供水安全提供重要依据。

1 工程概况

引嘉入汉工程由嘉陵江干流低坝引水枢纽和输水隧洞两大部分组成,工程取水点在嘉陵江干流略阳县城区间,采用低坝引水,以超长隧洞穿越嘉陵江与汉江分水岭,引水至汉江上游的沮河支流白河,引水线路长约 30 km,设计引水流量 40 m^3/s ,其水资源系统网络图见图 1。

通过对《陕西省引嘉入汉工程规划》和《引汉济渭受水区输配水工程规划专题报告》分析^[3,8-9],嘉陵江略阳断面多年平均径流量 34.1 亿 m^3 ,多年平均可调水量为 6.7~10.3 亿 m^3 ,近期 2030 年和中远期 2040 年工程拟定补给引汉济渭受水区(西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 5 个重点城市供水,共计 16 个受水单元)需水缺口分别为 5.43 亿 m^3 和 8.14 亿 m^3 。从多年平均可调水量和需求缺口对比来看,引嘉入汉工程能够提供可靠的水源保障。然而,由于工程调水段来水和配水段需水在时间以及流量上的不一致性,需在引嘉入汉调配水过程中,设置合理的工程调蓄措施。调蓄节点布设包含三种情况:①输水隧洞上游调蓄;②输水隧洞下游调蓄;③输水隧洞上下游联合调蓄^[9]。

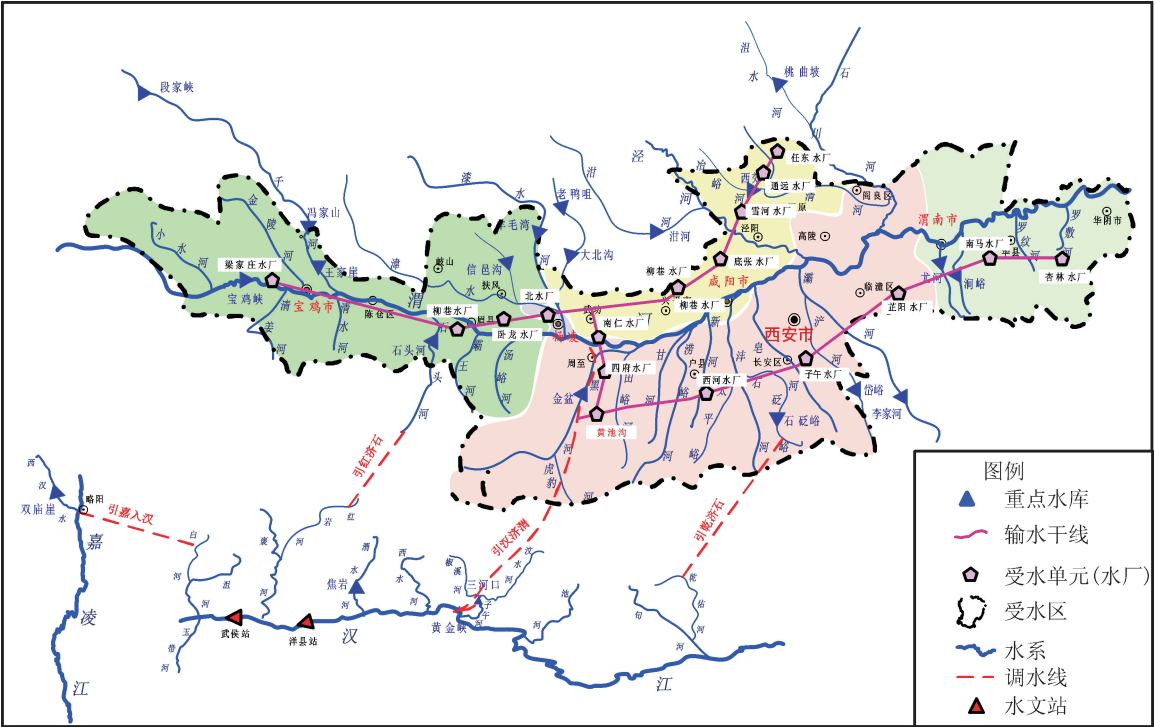


图 1 引嘉入汉济渭工程水资源系统网络图

Fig. 1 Water resource system network diagram for Jialing River-to-Hanjiang River-to-Weihe River water transfer project

2 模型构建

针对调水区来水过程和受水区可接纳调水过程不匹配问题,构建复杂水资源系统调蓄计算时变耦合模型,建立多水源、多用户的时变耦合矩阵及相关算法,通过时变耦合矩阵进行自我调整,实现复杂水资源系统供水过程与需求过程的动态平衡,从而确定调水工程所需调蓄库容,进而确定工程规模。

2.1 目标函数

目标函数设置为:

$$\text{Min}F(t) = D(t) - A(t)S(t) \tag{1}$$

式中: $D(t)$ 为需求向量,可表示为: $D(t) = [D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)]^T$, $D_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个受水单元的需水量 ($i = 1, 2, \dots, n$),单位为 m^3 ; $S(t)$ 为供给向量,可表示为: $S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_m(t)]^T$, $S_j(t)$ 为第 j 类水源在 t 时刻的供水流量 ($j = 1, 2, \dots, m$),单位为 m^3 ; $A(t)$ 为耦合矩阵: $A(t) = (a_{ij}(t))$, $a_{ij}(t)$ 为第 i 个受水单元在 t 时刻分得的第 j 类水源的权重,为无量纲数。

当式(1)中需求变量 $D(t)$ 作为已知确定后,系统的平衡求解问题转换为不同来水情境下供给向量 $S(t)$ 与耦合矩阵 $A(t)$ 中各元素值的内部调整,直至达到最佳平衡状态,即求得优化平衡解 $S^*(t)$ 和 $A^*(t)$,使得 $F(t) = D(t) - A^*(t)S^*(t)$ 的 1-范数

最小 ($\min(\|F(t)\|_1)$)。

2.2 约束条件

约束条件为如下。

- ① $0 \leq a_{ij} \leq 1, \sum_{i=1}^n a_{ij} = 1$ 。
- ② $0 \leq S_j(t) \leq S_j^{\max}, S_j^{\max}$ 为第 j 类水源的设计最大供水流量。

供需平衡的必要条件是: $\sum_{i=1}^m S_i(t) = \sum_{i=1}^n D_i(t)$,要让系统在每一个时段都达到供需平衡,即: $\forall t \in R$,使得 $F(t) = [0, 0, \dots, 0]^T$,难度较大。因为水文过程具有随机性,供给向量 $S(t)$ 随之具有不确定性,如果 $S(t)$ 的不确定性在系统自调节范围内,则通过耦合矩阵中的元素值 a_{ij} 和 $S(t)$ 中的元素 $S_j(t) \in [0, S_j^{\max}]$ 的自调节依然能够实现供需平衡;如果 $S(t)$ 中的某一元素值 $S_p(t)$ 严重偏大或偏小,例如: $S_p(t) > \sum_{i=1}^n D_i(t)$,即使 $S_j(t) (j = 1, 2, \dots, m, j \neq p)$ 均为“0”,依然无法实现精准平衡。

2.3 模型求解

- 1) 结合实际情况和工程参数,采用粒子群算法寻找 $S(t)$ 和 $A(t)$ 中各元素的边界值,即求得优化平衡解 $S^*(t)$ 和 $A^*(t)$,得到使 $\|F(t)\|$ 较小(难以达到最小)的优化平衡解,继而得到 $F(t)$ 的图谱。
- 2) 判断受水单元是否需要调蓄,当元素值

$F_i(t) > 0$ 时,表示 t 时刻第 i 个受水单元缺水;当 $F_i(t) < 0$ 时,表示 t 时刻第 i 个受水单元水量供给富余,需要调蓄。

3) 将 $F_i(t)$ 对时间积分可以得到积分函数 $\varphi_i(t) = \int F_i(t) dt$, $\varphi_i(t)$ 表示在某一计算时段内第 i 个受水单元的蓄水量,单位为 m^3 ,所有计算时段内 $\varphi_i(t)$ 的最高值 $\varphi_i^{\max}$ 和最低值 $\varphi_i^{\min}$ 之间的差值 $\varphi_i = \varphi_i^{\max} - \varphi_i^{\min}$ 即为受水单元 i 所需理论调蓄库容,单位为 m^3 。

4) 根据受水单元与调蓄节点的对应关系确定各调蓄节点所需调蓄库容。

3 调蓄方案

3.1 方案设置

根据引嘉入汉工程调蓄边界与调蓄节点选址两方面的影响因素,针对工程近期 2030 年和中远期 2040 年,选取调蓄节点位置、工程可调水量、受水区需水缺口和过洞能力(均为 $40\text{ m}^3/\text{s}$)等 4 个方面组合设置了 4 种调蓄方案,具体见表 1。

表 1 引嘉入汉工程调蓄方案集

Tab.1 Regulation and storage scheme set for Jialing River to Hanjiang River water transfer project				
水平年	方案	调蓄节点设置	调蓄边界	
			可调水量/亿 m^3	需水缺口/亿 m^3
2030	I	上游	10.2	5.43
	II	下游	8.04	5.43
	III	上下游	10.2	5.43
	IV	无	10.2	5.43
2040	I	上游	10.2	8.14
	II	下游	8.04	8.14
	III	上下游	10.2	8.14
	IV	无	10.2	8.14

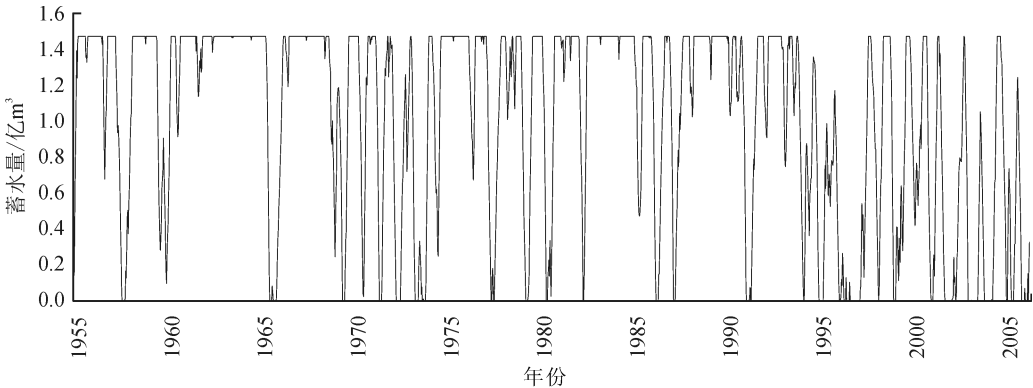


图 2 2030 年方案 II 调水工程下游逐旬调蓄过程

Fig. 2 Regulation and storage process every ten days for downstream of water transfer project under scheme II in 2030

方案 I 采用上游调蓄,即将调蓄节点设置在引嘉入汉工程输水隧洞上游,将略阳站长系列逐旬可调水量(考虑过洞能力前的可调水量)和受水区长系列逐旬需水缺口作为调蓄边界;

方案 II 采用下游调蓄,即将调蓄节点设置在工程输水隧洞下游,将略阳站长系列逐旬可调水量(考虑过洞能力后的可调水量)和受水区长系列逐旬需水缺口作为调蓄边界;

方案 III 采用上下游联合调蓄,即将调蓄节点分别设置在工程输水隧洞上游和下游,将略阳站长系列逐旬可调水量(考虑过洞能力前的可调水量)和受水区长系列逐旬需水缺口作为调蓄边界;

方案 IV 无调蓄,即工程不设置调蓄节点,将略阳站长系列逐旬可调水量(考虑过洞能力前的可调水量)和受水区长系列逐旬需水缺口作为供需边界,此方案为对照方案。

3.2 方案分析

由于篇幅所限,仅列出引嘉入汉工程多年平均保证率下各种组合方案 1955—2006 年 52 年长系列逐旬调蓄计算结果,并以 2030 年方案 II 为例进行说明。该方案以可调水量为 $8.04\text{ 亿 }m^3$,受水区需水缺口为 $5.43\text{ 亿 }m^3$,将其作为调蓄边界,调蓄节点设置在工程输水隧洞下游,利用以上构建的时变耦合模型,得到 2030 年方案 II 调水工程下游的调蓄过程、受水区的供水过程和缺水过程,以及调蓄后向汉江下游的补水过程,见图 2~5。取蓄水过程的最大值与最小值的差值,并结合调水工程下游可行调蓄节点及调蓄潜力分析^[16],确定调水工程下游所需实际调蓄库容为 $1.5\text{ 亿 }m^3$,受水区供水量为 $4.91\text{ 亿 }m^3$,缺水量为 $0.52\text{ 亿 }m^3$,缺水程度为 9.6% ,缺水旬数为 196 旬,缺水旬数所占总旬数比例为 10.47% ,调蓄后向汉江下游的补水量为 $3.13\text{ 亿 }m^3$ 。

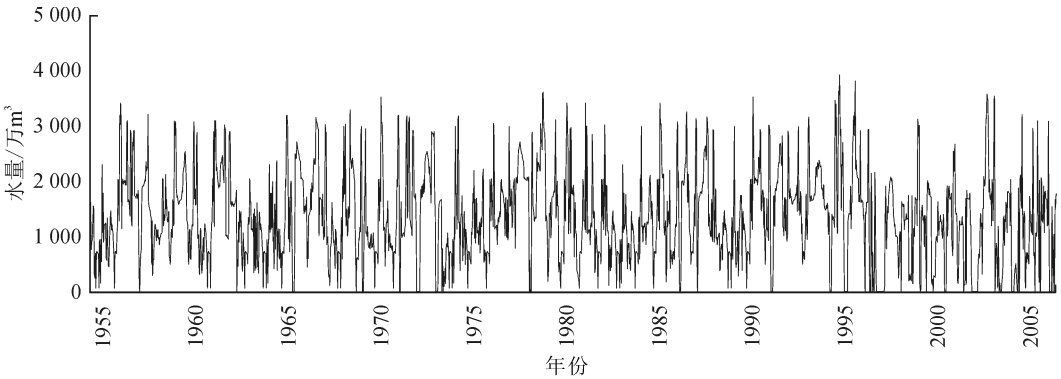


图 3 2030 年方案Ⅱ受水区逐旬供水过程

Fig. 3 Water supply process every ten days for water-receiving districts under scheme II in 2030

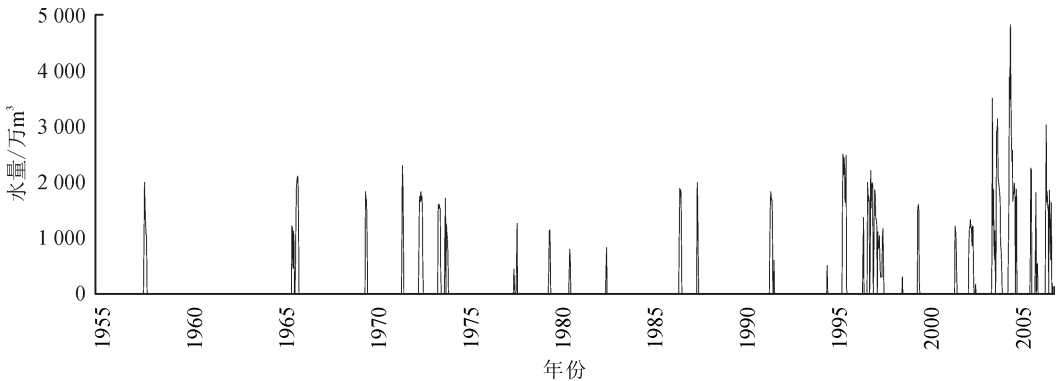


图 4 2030 年方案Ⅱ受水区逐旬缺水过程

Fig. 4 Water shortage process every ten days for water-receiving districts under scheme II in 2030

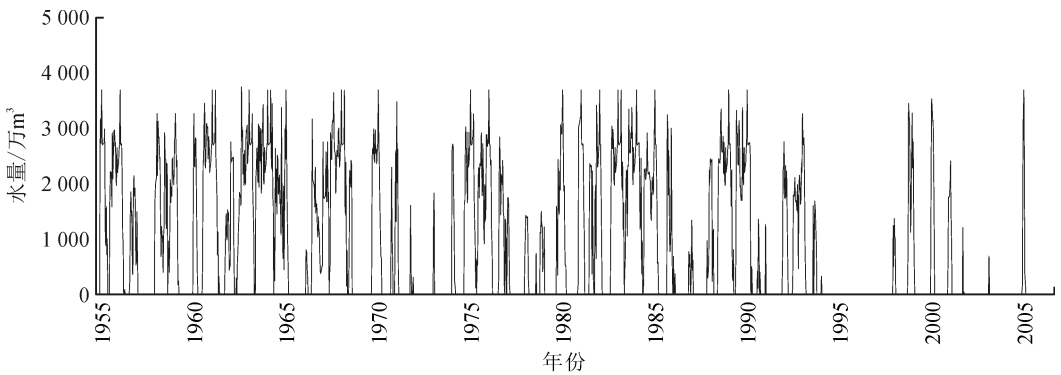


图 5 2030 年方案Ⅱ汉江下游逐旬补水过程

Fig. 5 Water supplement process every ten days for downstream of Hanjiang River under scheme II in 2030

3.3 方案优选

引嘉入汉工程各方案的调蓄结果见表 2。方案优选过程中,提高受水区供水保障程度是最重要目的之一。在此基础上,保证调蓄库容最小以降低调蓄工程施工难度和规模。此外,还应考虑调水工程对上游嘉陵江生态用水、对下游汉江干流重点河段(平川段)生态需水的影响。

1) 从受水区需水缺口保障程度角度分析:由表 2 可知,引嘉入汉工程实施后,2030 年方案Ⅳ缺水程度最大为 30.8%,其余方案缺水程度均小于 10%,2040 年方案Ⅳ缺水程度最大为 31.4%,其余方案均缺水程度基本小于 15%,可以看出,设置调蓄节点

以后,很大程度上弥补了引汉济渭工程受水区的需水缺口,缺水旬数所占比例也有较大幅度下降。

2) 从调蓄工程调蓄库容角度分析:基于引嘉入汉工程上下游可行调蓄节点及调蓄潜力分析^[12],利用上述构建的时变耦合模型,确定各方案的调蓄库容见表 2,工程上游调蓄可选择双庙崖水库作为调蓄节点,调蓄库容为 1.5 亿 m³,工程下游调蓄可选择焦岩水库和汉江主河道槽蓄作为调蓄节点,调蓄库容分别为 5 000 万 m³和 1 亿 m³,总调蓄库容为 1.5 亿 m³,上下游联合调蓄时,可选择双庙崖水库和汉江主河道槽蓄作为调蓄节点,调蓄库容分别为 1.5 亿 m³和 1 亿 m³,总调蓄库容为 2.5 亿 m³。考虑工程建设

的难易程度及管理的便捷性等,引嘉入汉工程以下游布设调蓄节点的方案优先(方案Ⅱ),其次是上游调蓄(方案Ⅰ),最后是上下游联合调蓄(方案Ⅲ)。

3) 从调水工程上游嘉陵江生态用水影响角度分析:根据工程规划阶段对嘉陵江略阳调水断面可调水量分析,可调水量中已经扣除了调水断面以上地区耗水水量和下游生态需水量(生态基流为 21.6 m³/s),同时也扣除了引水沙限(10 kg/m³)不能引的水量,此外,还考虑了《嘉陵江流域综合规划》对流域水资源开发利用率的限制。因此,各方案对工程

上游嘉陵江流域生态用水影响不大。

4) 从调水工程下游汉江平川段生态需水影响角度分析:选取武侯站与洋县站作为汉江平川段进出口的代表站,两站点的生态基流分别为 3.89 m³/s 和 18.3 m³/s,各方案对应代表站生态基流满足程度见表 3。从表 3 可以看出,各方案对工程下游汉江平川段生态基流满足程度影响显著,不同水平年采用方案Ⅲ上下游联合调蓄时,对生态基流满足程度最高,方案Ⅰ由于采用工程上游调蓄,对汉江的补充水量基本为 0,故生态基流的满足程度最低。

表 2 引嘉入汉工程调蓄方案结果

Tab. 2 Results of regulation of and storage scheme for Jialing River to Hanjiang River water transfer project

水平年	调蓄方案	调蓄节点设置	调蓄库容/亿 m ³	受水区供水量/亿 m ³	汉江补水量/亿 m ³	缺水量/亿 m ³	缺水程度/%	缺水旬数所占比例/%
2030	I	上游	1.5	4.94	0.00	0.49	9.0	10.47
	Ⅱ	下游	1.5	4.91	3.13	0.52	9.6	10.70
	Ⅲ	上/下游	1.5/1	5.09	4.80	0.34	6.3	6.78
	Ⅳ	无	—	3.76	4.28	1.67	30.8	34.50
2040	I	上游	1.5	7.00	0.00	1.14	14.0	18.11
	Ⅱ	下游	1.5	6.86	1.18	1.28	15.7	27.40
	Ⅲ	上/下游	1.5/1	7.38	2.58	0.76	9.3	11.30
	Ⅳ	无	—	5.58	2.46	2.56	31.4	47.80

表 3 不同方案生态基流满足程度

Tab. 3 Satisfaction degree of ecological base flow in different schemes

站名	2030 年不同方案生态基流满足程度/%				2040 年不同方案生态基流满足程度/%			
	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
武侯站	86.20	91.70	95.63	94.21	83.50	90.09	93.21	91.51
洋县站	84.03	90.02	93.35	92.60	81.08	88.04	91.10	90.20

综上所述,近期 2030 年将方案Ⅱ作为推荐调蓄方案,该方案采用下游调蓄,总调蓄库容为 1.5 亿 m³,方案实施后,受水区缺水程度为 9.6%,缺水旬数所占比例为 10.7%。与其他方案相比虽然不是最优方案,但无论从供水保障程度,还是从供水的时间保证来看,都是可以接受的,并且工程实施难度小,易于管理,降低了经济成本。中远期 2040 年将方案Ⅲ作为推荐调蓄方案,该方案采用上下游联合调蓄,调蓄库容分别为 1.5 亿 m³ 和 1 亿 m³,受水区缺水程度为 9.3%,缺水旬数所占比例为 11.3%,缺水程度在 10%以内,总体供水保障程度以及供水时间保证率都比较理想,且对汉江下游生态基流的满足程度提升效果明显。

4 结 论

1) 引嘉入汉工程调蓄方案设计思路:针对引嘉入汉工程调水区来水过程与受水区需求过程时空不

匹配的问题,在明确工程调蓄边界的前提下,考虑调蓄节点的设置原则、渠道过水能力等,设置可行的调蓄方案集,利用复杂水资源系统时变耦合模型,对方案进行调蓄分析,考虑引嘉入汉工程对受水区需水缺口保障程度、对上游嘉陵江生态用水,以及对下游汉江干流生态基流满足程度等,并结合工程实际中可行的调蓄节点选址及调蓄潜力分析等,给出推荐调蓄方案。

2) 推荐调蓄方案:近期 2030 年,选取方案Ⅱ作为推荐调蓄方案,方案采用下游调蓄,将汉江主河道槽蓄和焦岩水库作为调蓄节点,总调蓄库容为 1.5 亿 m³,从各项指标情况来看,均在可接受的范围之内。中远期 2040 年,选取方案Ⅲ作为推荐调蓄方案,方案采用上下游联合调蓄,将双庙崖水库和汉江主河道槽蓄作为调蓄节点,调蓄库容分别为 1.5 亿 m³ 和 1 亿 m³,工程实施难度不大,方案供水保障程度为 90.7%,对汉江平川段代表站生态基流的保证

程度均在90%以上,对于该区域的生态文明建设意义重大。

3) 采用复杂水资源系统时变耦合模型进行方案的调蓄计算,具有较强的适应性和灵活性,在上述引嘉入汉工程实例中,可较好地模拟不同组合方案下各调蓄节点的调蓄库容,对于确定调蓄工程总体规模具有很强的适用性,为解决复杂水资源系统调蓄需求计算提供了科学的计算方法。

参考文献:

- [1] 杨晓茹,费良军,张永永,等. 引汉济渭调水工程受水区水资源优化配置研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4):6-10.
YANG Xiaoru, FEI Liangjun, ZHANG Yongyong, et al. Research on optimal allocation of water resources for Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project[J]. Journal of Water Resources Architectural Engineering, 2012, 10(4):6-10.
- [2] 张永永,黄强,姜瑾,等. 陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(2):165-170.
ZHANG Yongyong, HUANG Qiang, JIANG Jin, et al. Research on the optimal allocation of water resources in benefited areas in water diversion from Han River to Wei River Project[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(2):165-170.
- [3] 陕西省引汉济渭工程协调领导小组办公室. 陕西省引嘉入汉工程规划[R]. 西安:陕西省引汉济渭工程协调领导小组办公室, 2016.
- [4] 王光谦,欧阳琪,张远东,等. 世界调水工程[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [5] 傅长锋. 南水北调中线在线调蓄工程分析[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(5):6-8.
FU Changfeng. Analysis of the on-channel Diversion of the Middle Sonth-to-Noth Water Transfer[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(5):6-8.
- [6] 傅长锋,张米军. 南水北调配套调蓄工程技术研究及设计要点[J]. 水利水电技术, 2005, 36(4):65-67.
FU Changfeng, ZHANG Mijun. Technical research and key design points of storage basin projects: South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(4):65-67.
- [7] 娄华君,李涛,王宏. 南水北调中线工程的水量调蓄问题及对策[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, (增刊):167-172.
LOU Huajun, LI Tao, WANG Hong. Problems and solutions of water transferring and storing for South-to-North Diversion project[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, (S):167-172.
- [8] 陕西省水利电力勘测设计研究院. 陕西省引汉济渭工程可行性研究-受水区水资源配置[R]. 西安:陕西省水利电力勘测设计研究院, 2011.
- [9] 陕西省水利电力勘测设计研究院. 陕西省引汉济渭工程可行性研究-受水区输配水工程规划[R]. 西安:陕西省水利电力勘测设计研究院, 2011.
- [10] 蒋建军,刘家宏,严伏朝,等. 浅议引汉济渭几个关键技术问题[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5):133-136.
JIANG Jianjun, LIU Jiahong, YAN Fuchao, et al. Preliminary discussion about several key technical issues of the water transfer project from Hanjiang River to Weihe River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5):133-136.
- [11] 刘家宏,严伏朝,牛存稳,等. 浅议引汉济渭配水工程调蓄研究的关键问题[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3):244-248.
LIU Jiahong, YAN Fuchao, NIU Cunwen, et al. Key issues on water distribution system of the water transfer project from Hanjiang River to Weihe River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(3):244-248.
- [12] 刘家宏,魏娜,牛存稳,等. 复杂水资源系统调蓄计算的时变耦合模型[J]. 科学通报, 2014, 59(30):2989-2996.
LIU Jiahong, WEI Na, NIU Cunwen, et al. Time-variant coupling model for regulation and storage calculation of complex water resources systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(30):2989-2996.
- [13] 郑德凤,王本德,年廷凯. 地下水库调蓄能力综合评价的指标体系与模糊集方法[J]. 水科学进展, 2005, 16(5):720-725.
ZHENG Defeng, WANG Bende, NIAN Tingkai. Index system and fuzzy sets theory for comprehensive evaluation on regulation and storage capacity of underground reservoir[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5):720-725.
- [14] 郑德凤,王本德. 地下水库调蓄能力综合评价方法探讨[J]. 水利学报, 2004, 35(10):56-62.
ZHENG Defeng, WANG Bende. Evaluation method for regulation and storage capacity of underground reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10):56-62.
- [15] 张英贵. 径流式水电站调蓄库容的利用[J]. 水力发电学报, 1992, (1):47-50.
- [16] 陕西省引汉济渭工程协调领导小组办公室. 引嘉入汉工程上下游调蓄工程作用与影响研究报告[R]. 西安:陕西省引汉济渭工程协调领导小组办公室, 2017.

(责任编辑 王绪迪)