

西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配模拟

刘珏珏¹, 李伟红¹, 赵雪²

(1. 西安财经大学 管理学院, 陕西 西安 710100; 2. 空军工程大学 基础部, 陕西 西安 710043)

摘要: [目的] 建立陕西省西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配模拟模型, 为西安市水资源可持续发展提供决策依据。[方法] 在分析西安市供水工程和用水户基础上, 绘制水资源系统网络概化图, 构建了多水源联合调配模拟模型, 确定调配规则。通过典型年和长序列年法求解模型, 得到不同来水频率情况下的多水源联合调配方案。[结果] 2020 水平年, 来水频率分别为 50%, 75% 和 95% 时, 引汉济渭调水量分别占西安市需水量的 39.74%, 37.59% 和 35.33%; 在特别枯水年, 引汉济渭供生活用水达 $1.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占西安市生活需水总量的 36.28%。[结论] 计算结果表明, 引汉济渭工程通水后, 西安市水资源短缺局面得到缓解, 调水量对保障西安市供水安全发挥了极大的作用。

关键词: 水文学及水资源; 水资源配置; 联合调配; 陕西省引汉济渭工程; 黑河引水工程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)01-0136-06

中图分类号: TV213.9

文献参数: 刘珏珏, 李伟红, 赵雪. 西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配模拟[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 136-141. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.020; Liu Honghong, Li Weihong, Zhao Xue. Joint operation simulation of multi water sources of Hanjiang River to Weihe River water transfer project and Heihe River diversion project in Xi'an City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 136-141.

Joint Operation Simulation of Multi Water Sources of Hanjiang River to Weihe River Water Transfer Project and Heihe River Diversion Project in Xi'an City

Liu Honghong¹, Li Weihong¹, Zhao Xue²

(1. School of Management Engineering, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an, Shaanxi 710100, China; 2. Department of Basic Science, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: [Objective] A simulation model of the multi-source joint allocation for the Hanjiang to Weihe River water transfer project and Heihe River diversion project of Shaanxi Province was established. This was aimed at providing a basis for the sustainable development of water resources in Xi'an City. [Methods] Based on the analysis of the water supply project and the consumers of water in Xi'an City, the mixing rule was determined. This was achieved by constructing a network generalization map of the system of water resources and by building a simulation model of the multi-source joint allocation. Through a long series of calculations, the joint deployment scheme for different water supply frequencies was obtained. [Results] In 2020, when the incoming water frequency will be 50%, 75% and 95% respectively, the water supply of the Hanjiang River will be 39.74%, 37.59% and 35.33%, respectively. In the special dry year, the water supply of the Hanjiang River was $1.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 36.28% of the total water demand in Xi'an City. [Conclusion] The water shortage in Xi'an City can be effectively alleviated by the implementation of the water diversion project, which has played a significant role in ensuring the safety of the water supply in Xi'an City.

Keywords: hydrology and water resources; allocation of water resources; joint operation; Hanjiang River to Weihe River water transfer project of Shaanxi Province; Heihe River diversion project

西安作为西北地区的第一大城市是国家重要的教育、科研和工业基地。然而西安市城市供水长期滞

后于社会经济的发展,特别是西部大开发战略实施以来,西咸一体化建设、西安国际化大都市发展要求西

安市的用水需求将会越来越大,西安市的供水紧张局面将进一步加剧。引汉济渭调水工程作为陕西省内的“南水北调”工程即是针对这一问题规划的重大水资源配置措施,对于西安市这种典型的多水源供水情况,在承接区外调水的同时,如何实现多水源合理调配,使水资源管理更加有效、更加经济,如何实现区外调水与本地水资源联合供水系统优化运行,成为急待解决的问题。张静等^[1]应用区间两阶段随机规划法,建立多水源联合供水优化调度模型,对多水源调水目标进行了优化。刘建林等^[2]通过对供水系统优化调度动态规划模型进行调试计算,制定了当地水与外调水多水源情况下,不同来水组合的优化调度方案。本文针对西安市多水源联合供水这一实际情况,开展西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配模拟研究。基于诸多研究成果,本文在充分利用引汉济渭外调水量的情况下,建立西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配模拟模型,采用典型年和长序列资料时历法对上述模拟模型进行求解,得出来水频率

分别为 50%,75%,95%这 3 种情况下的引汉济渭与黑河引水工程联合调配方,以期西安市水资源可持续发展提供决策依据。

1 引汉济渭工程概况

“引汉济渭”是陕西省的“南水北调”骨干工程,该工程是将汉江水引入关中以补充西安、咸阳、渭南等大中城市用水,以缓解关中渭河沿线城市和工业缺水问题。引汉济渭工程是经国务院批复的《渭河流域重点治理规划》中的水资源配置骨干项目,也是国务院批准颁布的《关中一天水经济区规划》的重大基础设施建设项目。“引汉济渭”调水区选在汉江干流黄金峡河段和汉江支流子午河口两处,在黄金峡修建黄金峡水利枢纽,通过库区左岸的抽水泵站抽取汉江水经过“黄三”输水工程进入子午河上修建的三河口水库,经水库调蓄后,自流穿过秦岭输水隧洞,进入渭河支流黑河金盆水库,不参与金盆水库调蓄,直接向渭河流域关中地区补水。图 1 为引汉济渭工程示意图。

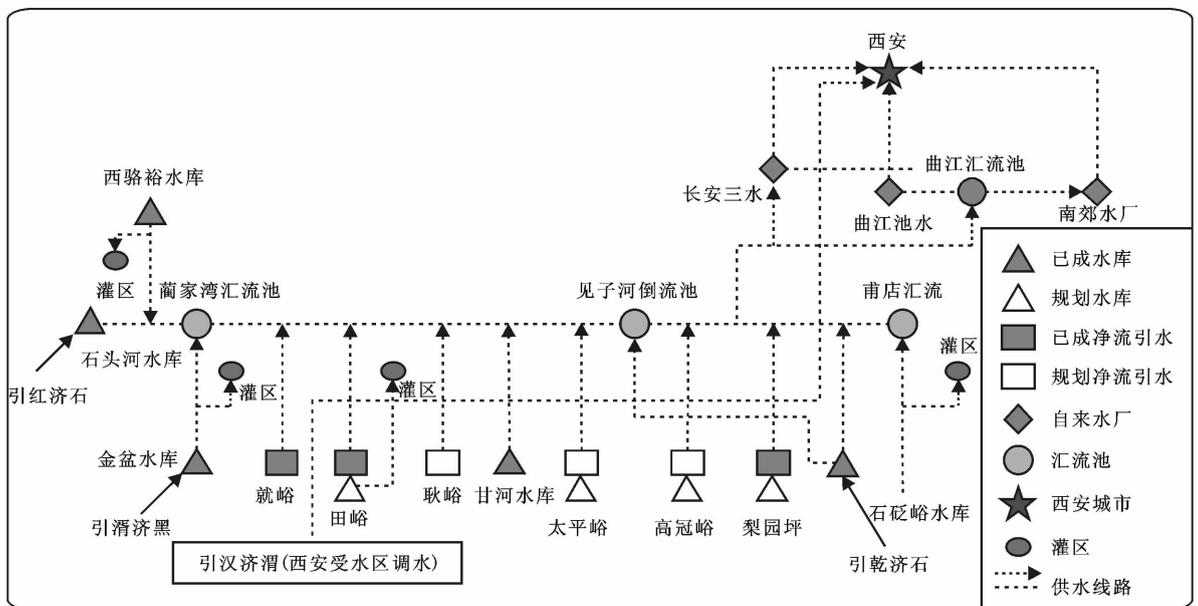


图 1 西安市多水源联合供水网络图

“引汉济渭”拟按“一次立项,分期配水”方案建设实施,2020,2025,2030 年调水量分别达到 5.00×10^8 , 1.00×10^8 , $1.50 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。西安市是引汉济渭工程受水区的重点城市,根据《陕西省引汉济渭工程可行性研究》,引汉济渭工程规划在 2020 年向西安市供水 $4.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2 西安市供水系统

2.1 地表水供水系统

西安市城市供水系统是以“黑河引水工程”为主

体的地表水供水系统,该工程是一项跨流域引水、综合利用的大型水利工程,以西安市城市供水为主,兼有农业灌溉、发电、防洪等综合效益。根据《西安市供水“一二五”规划》,黑河引水工程扩充后,至规划水平年 2020 年,将包含黑河金盆水库、石砭峪水库、石头河水库、甘河水库、西骆峪水库、梨园坪水库、高冠峪水库、太平峪水库、田峪水库共 9 座水库以及就峪、涝峪和耿峪 3 处径流引水工程。其中,石头河水库从 1996 年 6 月正式向西安供水,年计划供水量约 9.50

$\times 10^7 \text{ m}^3$, 2002 年黑河金盆水库建成后, 石头河水库成为西安市供水的补充水源, 其供水量有所减少。根据西安市与石头河水库管理局签订的供水协议, 石头河水库年均向西安市供水量为 $4.80 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。在拟

定多水源联合调配方案时, 综合考虑经济性、可行性及管道引水能力等多种因素, 就峪、涝峪和耿峪 3 处径流引水工程以每年 $7.50 \times 10^7 \text{ m}^3$ 作为定值进行供水。规划 2020 年黑河引水工程水库工程概况见表 1。

表 1 规划 2020 年黑河引水工程水库工程概况

水源工程	所属流域	管道引水能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	年均径流量/ 10^4 m^3	死水位/ m	死库容/ 10^4 m^3	防洪限制 水位/m	正常蓄 水位/m	兴利库容/ 10^4 m^3	水库灌溉 面积/ 10^4 hm^2
金盆水库(承接引渭济黑调水)	黑河	30.3	59 149.23	520	1 000	591	594	17 740	2.49
石砭峪水库(承接引乾济石调水)	石砭峪	15	13 555.16	675	75	725	731	2 510	1.12
甘河水库	甘河	4	2 162.13	575	55	608	616	102	—
石头河水库	石头河	6	46 103.00	728	330	798	801	12050	—
西骆峪水库	西骆峪河	3	2 148.08	565	50	575	580	340	0.33
田峪水库(规划)	田峪河	5	6 489.76	565	50	575	580	1 500	0.19
梨园坪水库(规划)	泮河	4	7 250.31	678	75	730	735	2 950	—
高冠峪水库(规划)	高冠河	4	6 014.73	650	75	760	765	2 000	—
太平峪水库(规划)	太平河	3	6 751.05	540	20	570	575	500	—

备注: 规划水库的管道引水能力为初步拟定值。

2.2 地下水及雨污水供水系统

西安市是中国严重缺水城市之一, 多年来地下水超采严重, 致使地下水位连年大幅度下降, 引发了地面下沉和地裂缝等一系列环境地质问题, 因此, 应严格控制地下水开采规模, 地下水取用量不允许超过允许可开采量^[1-4]。为了不影响城镇生活和工业用水需求, 规划水平年仍维持现有地下水供水能力, 不再扩大。西安市地下水的多年平均利用量在 $2.00 \times 10^8 \sim 2.40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 本文规划水平年地下水供水量取 $2.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据《西安市雨水利用规划》和《西安市污水处理及回用规划》, 规划年 2020 年雨水利用量为 $2.10 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, 中水回用量为 $2.78 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 合计 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2.3 西安市黑河引水工程需供水量预测

西安市用水量包括城市生活用水量、农业用水量、工业用水量以及河道外生态用水量。根据《西安市水利建设“一二五”规划》, 2020 水平年来水频率分别为 50%, 75% 和 95% 时西安市用水量分别为 1.51×10^9 , 1.56×10^9 , $1.63 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

西安市黑河引水工程需供水量是扣除地下水供水量及雨污水回用水量后的城市生活用水量、水库灌区农业用水量、工业用水量以及河道外生态用水量。2020 水平年来水频率为 50% 时, 西安市黑河引水工程需供水量为 $1.01 \times 10^9 \text{ m}^3$; 来水频率为 75% 时, 需供水量为 $1.06 \times 10^9 \text{ m}^3$; 来水频率为 95% 时, 需供水量为 $1.13 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

3 模型及方法

3.1 模拟模型

运用水资源系统模拟模型进行水资源供需分析计算时, 以节点和连线概化所描述系统的来水、供水、水源及需水, 并根据调配规则和约束条件, 计算各节点及全区的径流变化过程, 在时间和空间上模拟水资源利用特征^[5-9]。

水资源系统在物理上包括水源、用水户以及它们之间的输水连线等多种元素^[10-11], 水资源系统网络图由水源节点、用水户节点、汇流节点以及水力流向线组成。图 1 为 2020 水平年西安市多水源联合供水网络图。建立西安市多水源联合调配模拟模型时, 以水资源系统网络图为基础, 根据调配规则和约束条件描述各元素的运行调配方式与相互间的关系, 实现整个系统的模拟, 反映各水源真实运行情况。该系统对于西安市需满足生活、工业及城市生态环境用水需求, 对于各水库需满足生态基流量和灌区的农业用水需求^[12-16]。由于不同水平年各水库及调水工程的调配情况各不相同, 各水库的供水对象也不同, 基于系统的复杂性, 充分体现各供水水源的真实运行状况, 本文建立西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配模拟模型。

3.2 模拟调配规则

从水资源联合调配系统构成看, 模拟调配规则主要指供水优先顺序、用水优先顺序以及调度 3 个方面。供水方面具体规则: 优先采用雨水和中水回用水

量,其次利用径流引水及调蓄工程水量,再利用外调水量,最后利用当地地下水^[17-18]。用水方面具体规则:①雨水和中水回用水量首先保证城市生态环境用水,如有剩余可供给工业用水;②水库和径流引水工程均在保证河道生态基流量前提下,对水库灌区提供农田灌溉用水,再进行西安市城市供水;③对于西安市各用水部门,首先满足城市生活用水,其次满足工业用水,再是城市生态环境用水;④为保护和涵养地下水,取用地下水时,严格控制开采量,禁止超过允许可开采量,在特枯水年,地下水取用量控制为最大可开采量;⑤由于引汉济渭调水量不参与黑河金盆水库调蓄,在进行调节计算时,引汉济渭外调水量按照调水总量进行逐月平均分配。

3.3 约束条件

(1) 水库水量平衡约束。

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + R_{i,t} - L_{i,t} - S_{i,t} \quad (\forall i \in n) \quad (1)$$

式中: $V_{i,t}, V_{i,t+1}$ 为第 t 时段,第 i 个水库的初库容和末库容, $L_{i,t}, R_{i,t}, S_{i,t}$ 为第 t 时段,第 i 个水库的出库水量、入库水量和损失水量。

(2) 水库库容约束。

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (\forall i \in n) \quad (2)$$

式中: $V_{i,\min}$ 为第 i 个水库的死库容, $V_{i,\max}$ 为在汛期表示防洪限制水位对应的库容,在非汛期表示正常蓄水位对应的库容。

(3) 生态基流约束。

$$W_{STi,t} - D_{STi,t} \geq 0 \quad (\forall i \in n) \quad (3)$$

式中: $W_{STi,t}$ 为第 t 时段,第 i 个地表水源工程的生态基流量; $D_{STi,t}$ 为第 t 时段,第 i 个地表水源工程的生态基流目标值。

(4) 灌溉用水约束。

$$W_{GGi,t} - D_{GGi,t} \geq 0 \quad (\forall i \in n) \quad (4)$$

式中: $W_{GGi,t}$ 为第 t 时段,第 i 个水库工程的农田灌溉水量; $D_{GGi,t}$ 为第 t 时段,第 i 个水库灌区的农田灌溉需水量。

(5) 城市用水约束。

$$\sum_{t=1}^T M_{\min,t} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T q_{1it} + \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T q_{2jt} + \sum_{k=1}^l \sum_{t=1}^T q_{3kt} + \sum_{t=1}^T q_4 \leq \sum_{i=1}^n M_{\max,t} \quad (5)$$

式中: $M_{\max,t}, M_{\min,t}$ 为第 t 时段西安市需水量的上限和下限。 $q_{1it}, q_{2jt}, q_{3kt}, q_4$ 为第 t 时段,第 i 个地表水源工程、第 j 个地下水源工程、第 k 个雨水及中水回用工程、引汉济渭城市供水量。

(6) 供水渠道过流量约束。

$$Q_i \leq Q_{i,\max} \quad (\forall i \in n, \sum_{i=1}^n Q_i + Q' \leq Q_{T,\max}) \quad (6)$$

式中: $Q_{i,\max}$ 为第 i 个地表水源工程最大设计流量; Q' 表示引汉济渭来水流量, $Q_{T,\max}$ 为供水渠道的设计过流量。

(7) 地下水取水限制约束。

$$Q_j \leq Q_{j,\max} \quad (\forall j \in m) \quad (7)$$

式中: $Q_{j,\max}, Q_j$ ——表示第 t 时段,第 j 个地下水源工程的允许最大取水量和取水量。

(8) 变量非负约束。

3.4 模拟模型计算流程

本研究结合西安市引汉济渭与黑河引水工程联合模拟调配规则,采用典型年和长序列资料时历法对上述模拟模型进行了求解。模型计算流程如图 2 所示。

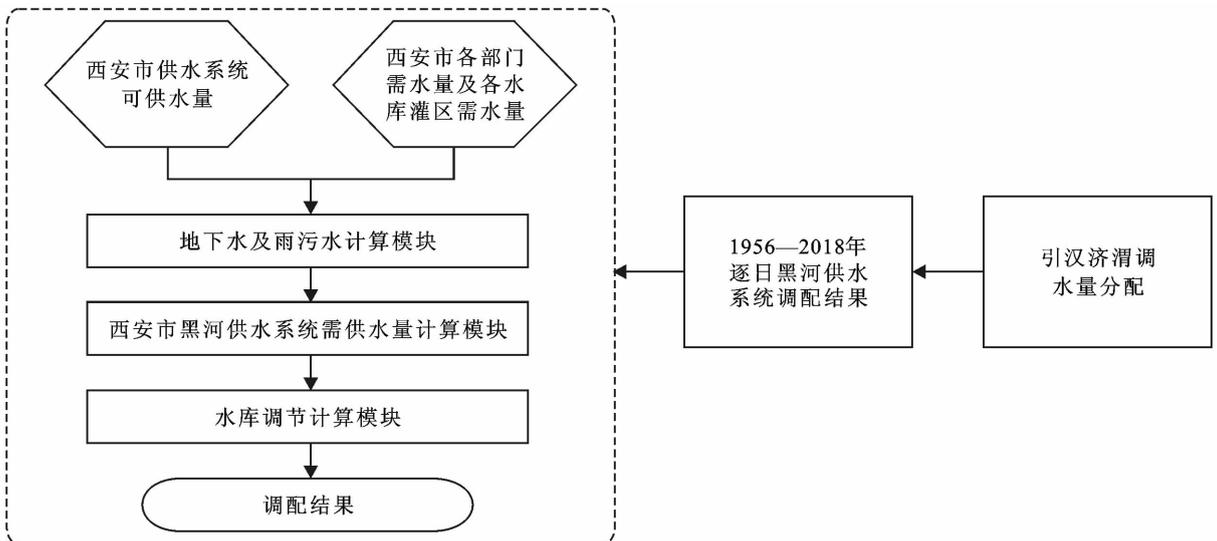


图 2 西安市多水源联合调配模拟模型计算流程图

4 结果与分析

4.1 2020 年引汉济渭与黑河引水工程联合调配结果

本文主要研究不同来水频率情况下,引汉济渭与黑河引水工程联合供水的可行性,及其联合供水的补偿关系。依据不同来水频率情况下黑河引水工程的

需水量和可供水量,以及引汉济渭调水规模和西安市各用水户配水指标,利用 1956—2018 年的长系列逐日径流资料,依据上述调配规则,以日为时段求解模型,得出来水频率分别为 50%,75%,95%这 3 种情况下的引汉济渭与黑河引水工程联合调配方案,结果详见表 2。

表 2 2020 年引汉济渭与黑河引水工程联合调配成果

来水频率	供需分析	城镇生活	工业	水库灌区	合计
50%	需水	3.280 3	5.928 4	1.033 7	10.142 4
	黑河引水工程	2.468 9	1.846 4	0.772 3	5.087 6
	供水 引汉济渭	0.811 4	3.231 9	0	4.043 3
	小计	3.280 3	5.078 3	0.772 3	9.130 9
	供需平衡	0	-0.750 1	-0.261 4	-1.011 5
75%	需水	3.280 3	5.828 4	1.535 9	10.644 6
	黑河引水工程	2.302 6	1.100 0	0.933 8	4.336 4
	供水 引汉济渭	0.977 7	3.065 6	0	4.043 3
	小计	3.280 3	4.165 6	0.933 8	8.379 7
	供需平衡	0	-1.662 8	-0.602 1	-2.264 9
95%	需水	3.280 3	5.828 4	2.206 8	11.315 5
	黑河引水工程	1.875 6	0.363 6	1.117 2	3.356 4
	供水 引汉济渭	1.190 2	2.853 1	0	4.043 3
	小计	3.065 8	3.216 7	1.117 2	7.399 7
	供需平衡	-0.214 5	-2.611 7	-1.089 6	-3.915 8

从表 2 可以看出,2020 水平年来水频率分别为 50%,75%,95%时的西安市黑河引水工程的需供水量分别为: 1.01×10^9 , 1.06×10^9 , 1.13×10^9 m^3 ,黑河引水工程可供水量分别为: 5.09×10^8 , 4.34×10^8 , 3.36×10^8 m^3 ,不考虑引汉济渭调水量时,西安市缺水量分别为 5.05×10^8 , 6.30×10^8 , 7.96×10^8 m^3 ,缺水程度分别达到 33.38%,40.31%,48.83%;引汉济渭工程通水后,根据《陕西省引汉济渭工程可行性研究》,规划 2020 年向西安市供水 4.04×10^8 m^3 ,此时来水频率分别为 50%,75%,95%时,西安市缺水量分别为 1.01×10^8 , 2.26×10^8 , 3.92×10^8 m^3 ,缺水程度为 6.68%,14.46%,24.05%。可以看出,调水之后缺水程度大大下降。

4.2 引汉济渭与黑河引水工程联合供水分析

由表 2 可知,2020 水平年,来水频率分别为 50%,75%,95%时,引汉济渭供水量分别占引汉济渭与黑河引水工程联合供水总量的 44.14%,48.09%,54.46%,占黑河引水工程需供水量的 39.74%,37.59%,35.33%,可见,引汉济渭调水量占西安市多水源联合供水总量很大比重。其中,调水量供工业的水量最多,3 个来水频率分别为 3.23×10^8 , 3.07×10^8 , 2.85×10^8 m^3 ,分别占调水量的 79.95%,75.99%,70.54%。由于黑河引水工程是在满足西安市生活用水的基础上向各工业部门供水,黑河引水工程多年平均生活供水量已占

其总供水量的 77.6%,加之工业需水量很大,实施引汉济渭工程,能够有效缓解工业用水的紧张局面。

在特枯水年,黑河引水工程可供水量减少,无法满足西安市生活需水要求。通过联合调配模型计算结果可见,引汉济渭工程通水后,西安市生活供水量达 1.19×10^8 m^3 ,占西安市生活需水总量的 36.28%,对保障生活供水安全发挥了极大的作用。

4.3 水库灌区农业灌溉保证率

引汉济渭工程通水后,黑河引水工程各水库供水优先顺序发生了变化,满足河道生态基流前提下,先向水库灌区供水,再向城市供水,各水库农业灌溉保证率均显著提高。引汉济渭工程未通水时,黑河饮水工程各水库主要目的是满足城市供水需求,挤占了大量农田灌溉用水,致使农业灌溉保证率偏低。表 3 为根据 1956—2018 年的长系列逐日径流资料计算结果,统计的各水库灌区农业灌溉保证率。

表 3 引汉济渭工程 2020 年通水后,调水与不调水情况下灌溉保证率 %

水库	50%		75%		95%	
	调水	不调水	调水	不调水	调水	不调水
金盆水库	51	7	22	0	40	0
石砭峪水库	54	11	25	0	42	0
西骆峪水库	60	23	37	0	45	0
田峪水库	61	27	40	0	48	0

5 结论

(1) 通过对西安市供水工程和用水户进行分析,绘制水资源系统网络概化图,在确定调配目标的基础上,构建了多水源联合调配模拟模型,并拟定了模拟调配规则。

(2) 通过典型年和长序列年法求解模拟模型,确定了来水频率分别为 50%,75%,95%时,西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配方案。计算结果表明,引汉济渭调水量在保证城市工业用水方面发挥着主要作用,同时工程实施后,黑河引水工程各水库供水优先顺序发生了变化,满足河道生态基流前提下,先向水库灌区供水,再向城市供水,各水库农业灌溉保证率均显著提高。在特枯水年,黑河引水工程可供水量减少,引汉济渭向城市生活供水量达到西安市生活需水总量的 36.28%,对保障生活供水安全发挥了极大的作用。

(3) 西安市属于资源性缺水城市,水资源供需矛盾日益突出。引汉济渭调水工程建成通水后,为西安市供水安全提供可靠保障,还可以归还河道被挤占的生态用水量。该工程能够缓解西安市水资源供需矛盾,实现以水资源的可持续利用支撑经济社会可持续发展的迫切需求。

[参 考 文 献]

- [1] 张静,黄国和,刘焯,等. 不确定条件下的多水源联合供水调度模型[J]. 水利学报,2009,40(2):160-165.
- [2] 刘建林,马斌,解建仓,等. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型:南水北调东线工程[J]. 水土保持学报,2003,17(1):75-79.
- [3] 畅建霞,姜瑾. 引汉济渭调水工程水资源配置研究[J]. 自然资源学报,2011,26(1):110-118.
- [4] 刘玘玘,汪妮,解建仓,等. 西安市多水源联合调度模型及应用[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):37-41.
- [5] Ostfeld A, Kogan D, Shamir U. Reliability simulation of water distribution systems-single and multiquality[J]. Urban Water, 2002,4(1):53-61.
- [6] Zhang H, Li H, Tam C M. Permutation-based particle

swarm optimization for resource-constrained project scheduling[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006,20(2):141-149.

- [7] 高申. 郑州市城区跨流域调水工程与调蓄水库联合调配研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [8] Rothman D W, Mays L W. Water resources sustainability: Development of a multi-objective optimization model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014,140(12):04014039.
- [9] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016,2(2):e1500323. DOI:10.1126/sciadv.1500323.
- [10] 于冰,梁国华,何斌,等. 城市供水系统多水源联合调度模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(6):874-884.
- [11] Mo Shuhong, Duan Haini, Shen Bing, et al. Interval two-stage stochastic integer programming for urban water resource management under uncertainty [J]. Journal of Coastal Research, 2015,73:160-165.
- [12] Hämäläinen R, Kettunen E, Ehtamo H. Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management [J]. Group Decision and Negotiation, 2001,10(4):331-353.
- [13] 齐子超. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [14] 张永永,黄文政,黄强,等. 陕西省南水北调工程受水区水资源供水情势综合评价[J]. 资源科学,2010,32(8):1499-1504.
- [15] 刘玘玘,尚宇梅,张宇,等. 引汉济渭来水条件下西安市多水源联合调度[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(1):25-30.
- [16] Rajasekaram V, Nandalal K D. Decision support system for reservoir water management conflict resolution [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005,131(6):410-419.
- [17] 章燕喃,田富强,胡宏昌,等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报,2014,45(7):844-849.
- [18] Willuweit L, O'Sullivan J J. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the dynamic urban water simulation model [J]. Water Research, 2013,47(20):7206-7220.

(上接第 135 页)

- [7] 曹秀丽,周叶奎. 台州卷烟物流配送中心 LID 措施的成本效益分析[J]. 价值工程,2017,36(11):75-77.
- [8] Ossa-Moreno J, Smith K M, Mijic A. Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK[J]. Sustainable Cities and Society, 2017,28:411-419.
- [9] Zhan Wenting, Chui T F M. Evaluating the life cycle net benefit of low impact development in a city [J].

Urban Forestry & Urban Greening, 2016,20:295-304.

- [10] 谭雪,石磊,陈卓琨,等. 基于全国 227 个样本的城镇污水处理治理全成本分析[J]. 给水排水,2015,51(5):30-34.
- [11] 谭雪,石磊,马中,等. 基于污水处理厂运营成本的污水处理费制度分析:基于全国 227 个污水处理厂样本估算[J]. 中国环境科学,2015,35(12):3833-3840.