

# 引汉济渭调水工程受水区水资源优化配置研究

杨晓茹<sup>1</sup>, 费良军<sup>2</sup>, 张永永<sup>3</sup>, 王新慧<sup>4</sup>

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048;  
3. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450002; 4. 陕西省农业工程勘察设计院, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 陕西省引汉济渭调水工程是解决关中地区严重缺水的跨流域调水工程, 在充分考虑受水区的经济、社会和生态环境等因素以及水资源供需平衡分析基础上, 基于系统分析方法建立了大系统分解协调模型, 以供水区综合效益最大、缺水量最小为全局最优解, 得到了2020年和2030年调水工程所调水量的优化配置方案。

**关键词:** 引汉济渭; 水资源优化配置; 大系统分解协调

中图分类号: TV212.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)04—0006—05

## Research on Optimal Allocation of Water Resources for Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project

YANG Xiao-ru<sup>1</sup>, FEI Liang-jun<sup>2</sup>, ZHANG Yong-yong<sup>3</sup>, WANG Xin-hui<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Electric Power, Xi'an, Shaanxi 710001, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;  
3. Yellow River Investigation and Planning and Design Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450002, China;  
4. Shaanxi Investigation and Design Institute of Agricultural Engineering, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

**Abstract:** Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project in Shaanxi is the way to solve the present water shortage of Guanzhong. Under sufficiently considering the factors of regional economic, societal and ecological environment, as well as the water balance between supply and demand in in-take areas, the large system decomposition-coordination model of water resources is set up based on the system analysis method. At the same time, the optimal water allocation schedule from Hanjiang during 2020 to 2030 could be achieved by considering the comprehensive benefit and water shortage in water-supply areas.

**Keywords:** Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project; optimal allocation of water resources; large system decomposition coordination

目前水资源优化配置研究的方法有很多种, 可概括为四类方法: 一是定性分析方法; 二是定量分析方法; 三是定性定量相结合的方法; 四是系统分析方法。其中系统分析方法是从整体的角度看待水资源配置系统, 从整个系统的要素出发, 对系统的构成以及功能进行分析, 从而运用相关的数学方法来进行求解。如目前较常用的利用大系统理论与方法求解大规模复杂水资源系统的优化问题, 其基本思路是将复杂的大系统依时间、空间或目标、用途等关系分解成相互独立的若干规模较小、结构相对简单的

子系统, 形成递阶层次结构模型; 然后采用现有的一般优化决策方法, 对各子系统分别择优, 实现各子系统的局部最优; 最后根据系统总目标, 修改和调整各子系统的输入和决策, 使各子系统相互协调配合, 实现整个大系统的全局最优。从求解程序而言, 分解是大系统算法的结构设计, 协调是大系统全局最优的保证<sup>[1-3]</sup>。

## 1 引汉济渭调水工程概况

陕西省引汉济渭工程是陕西省境内的一项大型

跨流域调水工程,工程在陕南地区的汉江干流黄金峡和支流子午河分别修建水源工程黄金峡水利枢纽和三河口水利枢纽,通过穿越秦岭的超长输水隧洞将汉江流域水量调至关中地区渭河流域。设计调水流量  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ , 2020 年调水  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2030 年调水量  $15 \times 10^8 \text{ m}^3$  (指从汉江流域调出的毛水量), 扣除越岭隧洞输水损失, 进入关中配水系统水量 2020 年为  $9.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2030 年为  $13.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其供水对象为关中地区渭河两岸的重点城市、县城以及工业园区。

### 1.1 受水区基本情况

引汉济渭工程受水区位于渭河宝鸡峡至潼关两岸的关中地区,南以秦岭为界,北至陕甘省界、泾河张家山及洛河淤头,总面积  $4.94 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 2008 年总人口 2 358 万人,其中城镇人口 1 151 万人,有效灌溉面积  $103.933 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 国内生产总值 4 347 亿元。受水区城镇连绵、产业密集、科教实力雄厚,集聚着陕西省最主要的社会经济资源,是关中天水经济区的核心区。根据计算,受水区多年平均自产地表水资源量  $51.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 地下水资源量  $43.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 扣除重复计算量后自产水资源总量为  $68.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 人均和耕地亩均水资源量分别为  $289 \text{ m}^3$  和  $297 \text{ m}^3$ , 仅为全国平均水平的 14% 和 17%, 属严重资源型缺水地区。

### 1.2 受水区现状及规划水平年供需分析

经现状供需水平衡分析,关中受水区现状需水总量  $73.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 可供水量  $49.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 缺水量  $23.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于水资源短缺,工业用水挤占农业、生态用水相当严重,区内地表水开发利用过度,地下水超采严重,导致渭河干支流断流,水污染加剧,生态环境问题日益突出,已成为制约当地经济社会持续快速发展的瓶颈。

根据《关中一天水经济区发展规划》,要通过建设“统筹科技资源改革示范基地、全国先进制造业重要基地、全国现代农业高技术产业基地、彰显华夏文明的历史文化基地”四个基地,将关中打造成全国内陆型经济开发开放战略高地。经济区将以西安国际化大都市为核心区辐射带动西部和北方内陆区形成西部发达的城市群和产业聚集地,未来 10~20 年时间对水的需求将达到高峰。按照实行最严格的水资源管理制度要求,并遵照“先节水,后调水”的方针,采取各项节水措施后 2020 年、2030 年受水区需水量将分别达到  $76.88 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $82.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 挖潜区内现有水源工程,考虑规划水源工程,同时进行污水

处理再利用等措施后 2020 年受水区缺水  $16.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2030 年缺水为  $21.14 \times 10^8 \text{ m}^3$  [4]。

### 1.3 供水对象确定

经过缺水形势分析,关中受水区缺水主要集中在渭河南北两岸的宝鸡峡至咸阳、咸阳至潼关两个水资源三级区,占关中地区总缺水量的 92.7%, 因此,引汉济渭工程受水区确定为渭河沿岸的两个水资源三级区;从缺水结构分析,城镇生活、生产缺水占总缺水量的 95% 以上,因此引汉济渭工程的供水主要为城镇生活、工业生产、生态环境。

### 1.4 调水规模

汉江干流黄金峡断面多年平均径流量  $76.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 支流子午河三河口断面多年平均径流量  $8.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 扣除上游地区经济社会发展用水要求,并满足下游断面生态和航运基流要求,黄金峡和三河口入库水量分别为  $59.62 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $7.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 调水区有丰沛的水量可调往关中。按照不影响国家南水北调中线一期调水量,遇汉江枯水年份,优先满足中线供水要求,服从汉江流域水资源统一管理和水量统一调度,经黄金峡、三河口水库联合调节 2020 年引汉济渭工程调水量(出秦岭隧洞)  $9.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2030 年调水量(出秦岭隧洞)  $13.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

## 2 引汉济渭工程调水量优化配置模型

### 2.1 水资源优化配置建模思路

将引汉济渭调水量分配给受水区各城市,各城市在分配到一定水量后,又对城市内的用水部门进行合理分配,从而形成使受水区产生最大效益的水资源最优配水过程。不同城市之间的配水属于整个受水区系统的优化过程,而城市内各用水部门之间的配水则属于每个城市子系统的优化。将城市内用水部门作为第一层,受水区内  $n$  个子区作为第二层,通过分配给每个子区的供水量将两层联系起来,成为一个具有两层谱系结构的大系统,适合用大系统分解协调模型求解 [5-6], 如图 1 所示。

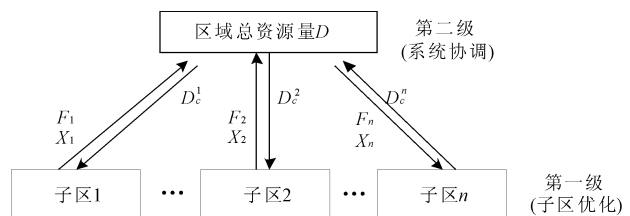


图1 水资源优化配置的递阶分解协调结构图

#### (1) 第一级子系统优化

第一级依自然地理条件和行政区划,将区域分

为  $n$  个子区。各子区是在第二级(协调级)给定预付资源量  $D_c^n$  的前提下进行各子区优化,子区优化仍是多目标优化。将第二级各子区求得的最优解和目标值反馈到第一级,进行第一级系统协调。

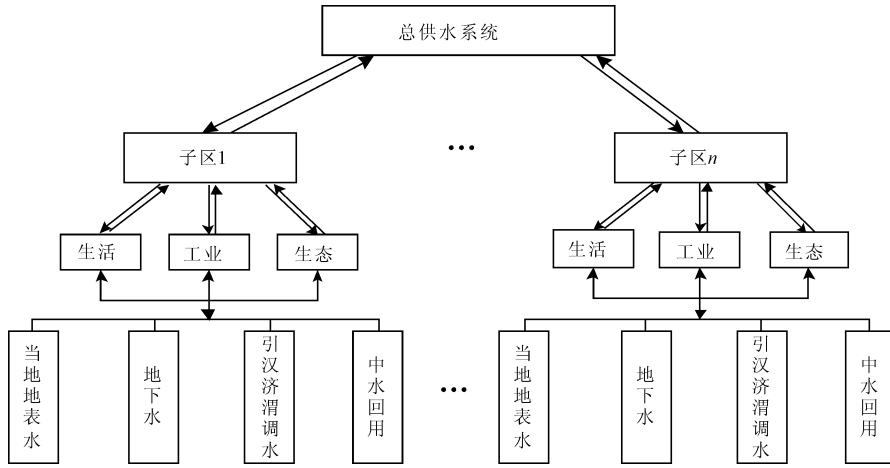


图 2 大系统分解协调模型概化图

## 2.2 水资源优化配置模型

### 2.2.1 子模型形式

#### (1) 水量分析模型

水资源的优化配置是解决水资源的短缺和用水竞争问题,为了更好地满足工农业的生产。水资源的配置应该使缺水量达到最小。模型形式为:

$$\text{目标函数: } \min \sum_n \sum_t (\sum_i Q_{ints} - Q_{nd})^2 \quad (1)$$

$$\text{约束条件: } 0 \leq Q_{ints} \leq Q_{intmax}$$

$$\sum Q_{ints} \leq Q_{nd}$$

式中:  $Q_{ints}$  为水源  $i$  给子区  $n$  在时段  $t$  的供水;  $Q_{nd}$  为子区  $n$  在时段  $t$  的需水;  $Q_{intmax}$  为时段  $t$  水源  $i$  向子区  $n$  所能提供的最大水量。

#### (2) 经济分析模型

水资源优化配置的目标之一是用水的经济效益最大。模型形式为:

$$\max \left( \sum_{nt} B_n \sum_i Q_{ints} - \sum_{int} C_{in} Q_{ints} \right) \quad (2)$$

$$s. t \quad \begin{aligned} Q_{ints} &\leq Q_{intmax} \\ \sum_t Q_{ints} &\leq Q_{nd} \end{aligned}$$

式中:  $B_n$  为效益系数;  $C_{in}$  为费用系数。

### 2.2.2 协调模型形式

以供水效益最大为目标建立如下模型:

$$\max \left\{ \sum_n \sum_t (w_{nd} S_{nt}^d + w_{ni} S_{nt}^i + w_{ne} S_{nt}^e) \right\} \quad (3)$$

$$S_{nt}^d + S_{nt}^i + S_{nt}^e = S_{nt}$$

式中:  $S_{nt}^d$ 、 $S_{nt}^i$ 、 $S_{nt}^e$  分别为  $t$  时段第  $n$  子区的生活、生

### (2) 第二级系统协调

第二级协调的任务即是协调各子区的局部最优解成为整个区域的最佳均衡解。两级系统的求解过程见图 2。

产和生态环境的供水量;  $S_{nt}$  为  $t$  时段第  $n$  子区的总供水量;  $w_{nd}$ 、 $w_{ni}$ 、 $w_{ne}$  分别为第  $n$  个区域的城市生活、生产和生态环境供水量的综合效益权重,可根据各用户的相对重要性或各用户单位供水量的净效益而设定。

## 3 引汉济渭调水工程水资源配置方案

### 3.1 2020 年配置方案

受水对象各城市为一个子区,用水户为生活、生产、生态,水资源优化配置子模型采用公式(1)和(2),协调模型采用公式(3)。其中供水水源  $i$  为城市现有和规划的当地供水水源、回用污水以及引汉济渭所调水量;计算时段  $t$  为全年。供水量均指供水水源处水量,外调水量指进入关中配水系统水量。2020 年初步拟定五个方案见表 1。

经求解计算得到 2020 年引汉济渭工程调水量  $9.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,扣除损失后配置关中各城市水量  $9.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据受水区内各区域的社会经济发展水平、自然地理和生态环境状况,调水量配置的基本原则为:① 优先选择缺水程度较大,且当地水源无法解决的地区作为调水配置首选区。② 选择经济条件较好,发展速度较快,水资源利用效率较高的地区。③ 供水线路尽可能集中,节约投资。经优化配置后采用方案五:既突出重点城市供水,同时又考虑了配水工程的经济合理性,引汉济渭工程与当地水源联合调配向西安、宝鸡、咸阳、渭南及杨凌五个大城市供水  $6.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,兴平到阎良等 11 个县级城市供

水 $2.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中引汉济渭工程配置给城镇生活 $2.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、生产 $6.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,沿途输水损失和回

归水量可向渭河河道生态补水 $4.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[7-9]</sup>。2020年引汉济渭受水区水量配置成果见表2。

表 1 引汉济渭受水区 2020 年配置方案集

方案	供水范围	缺水量 / $\times 10^8 \text{ m}^3$	人口 /万人	GDP / $\times 10^8$ 元	优点	缺点
方案一	5个重点城市:西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 13个县级城市:兴平、武功、眉县、周至、户县、长安、临潼、泾阳、三原、高陵、阎良、华县、华阴	9.57	1009	8259	突出重点,优先考虑大城市及县城	供水工程线路较长,没有向工业园区供水
方案二	5个重点城市:西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 10个县级城市:兴平、武功、眉县、周至、户县、长安、临潼、高陵、阎良、泾阳 2个园区:泾阳工业密集区、高陵泾河工业园区	9.68	975	8239	供水线路距离短,与现有供水工程配套良好	供水范围小,4个县城未能供给
方案三	5个重点城市:西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 10个县级城市:兴平、武功、眉县、户县、临潼、高陵、泾阳、三原、泾阳、华县、华阴	8.71	940	7721	优化了县城的供水结构、有效提高城市供水安全	没有结合供水工程线路
方案四	5个重点城市:西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 6个县级城市:兴平、眉县、户县、长安、临潼、阎良 5个园区:阳平工业园区、蔡家坡工业园区、高陵泾河工业园区、阎湖现代产业开发区、华阴罗敷工业园	10.47	962	8384	供水干线、支线一次修建到位,减少二次配水工程难度	一期工程任务量大
方案五	5个重点城市:西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 11个县级城市:兴平、武功、眉县、周至、户县、长安、临潼、泾阳、三原、高陵、阎良	9.34	973	8156	突出重点城市供水,同时考虑了配套工程的经济合理性	供水覆盖范围小,没有考虑工业园区供水

表 2 引汉济渭受水区 2020 年水量配置方案表

单位: $\times 10^8 \text{ m}^3$

城市	总需水	当地水供水量			引汉济渭供水量			回补河道内生态	
		地表水	地下水	再生水利用	总供水量	生活供水量	工业供水量		生态供水量
重点城市	西安	10.11	2.52	2.05	1.41	4.06	1.75	2.31	0
	宝鸡	2.88	1.97	0.30	0.51	0.00	0.00	0.00	0
	咸阳	2.45	0.00	0.67	0.64	1.12	0.27	0.86	0
	渭南	1.56	0.13	0.25	0.12	1.04	0.22	0.81	0
	杨凌	0.30	0.00	0.09	0.06	0.15	0.06	0.09	0
	小计	17.30	4.62	3.35	2.74	6.37	2.29	4.07	0
11个县级城市	4.89	0.69	1.14	0.36	2.64	0.50	2.14	0	
总计	22.18	5.31	4.49	3.10	9.01	2.80	6.21	0	

注:宝鸡市就近采用了石头河供水进行了水源置换,因此为引汉济渭间接供水区。

### 3.2 2030 年配置方案

2030年初步拟定五个方案见表3。

2030引汉济渭工程调水量 $13.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,扣除损失后配置关中各城市水量 $13.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而2030

年采用供水方案三,在2020年供水方案基础上,优先满足一期供水方案中选定的五个重点城市、11个县级城市的需水要求,然后优先向距先期配水对象较近的城市和工业园区供水。引汉济渭与当地水源

联合调配向西安、宝鸡、咸阳、渭南及杨凌 5 个大城市供水  $7.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 兴平到华县等 12 个县级城市供水  $4.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 沿渭 6 个工业园区供水  $1.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中引汉济渭工程配置给城镇生活

$2.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、生产  $10.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、河道外生态  $0.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。沿途输水损失和回归水量可向渭河河道生态补水  $5.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2030 年引汉济渭水量受水区配置成果见表 4。

表 3 引汉济渭受水区 2030 年配置方案集

方案	供水范围	缺水量 / $\times 10^8 \text{ m}^3$	人口 /万人	GDP / $\times 10^8 \text{ 元}$	优点	缺点
方案一	5 个重点城市: 西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 13 个县级城市: 兴平、武功、眉县、周至、户县、长安、临潼、泾阳、三原、高陵、阎良、华县、华阴 2 个园区: 蔡家坡经济技术开发区、高陵泾河工业园区	13.27	1345	16262	重点突出, 兼顾现状基础好的工业园区	供水范围小, 6 个工业园区未能供给
方案二	5 个重点城市: 西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 11 个县级城市: 兴平、武功、眉县、周至、户县、长安、临潼、泾阳、三原、高陵、阎良 4 个园区: 阳平工业园区、蔡家坡工业园区、扶风绛帐工业园区、眉县常兴工业园区	13.20	1298	16234	优先考虑区西部城市、工业园区的供水	东部城市的华阴、华县及附近工业园区未能供给
方案三	5 个重点城市: 西安、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌 12 个县级城市: 兴平、武功、眉县、周至、户县、长安、临潼、泾阳、三原、高陵、阎良、华县 6 个园区: 阳平工业园区、蔡家坡工业园区、眉县常兴纺织工业园区、扶风绛帐工业园区、泾阳工业密集区、高陵泾河工业园区	13.88	1351	16576	兼顾县城和工业园区, 同时考虑了配套供水工程的经济合理性。	

表 4 引汉济渭受水区 2030 年水量配置方案表

单位:  $\times 10^8 \text{ m}^3$

城市	总需水	当地水供水量			引汉济渭供水量				回补河道内生态	
		地表水	地下水	再生水利用	总供水量	生活供水量	工业供水量	生态供水量		
重点城市	西安	11.07	2.52	2.05	1.83	4.60	0.87	3.73	0	5.51
	宝鸡	3.20	2.09	0.30	0.72	0.00	0.00	0.00	0	
	咸阳	2.75	0.00	0.67	0.77	1.30	0.15	1.15	0	
	渭南	1.75	0.13	0.25	0.23	1.11	0.25	0.86	0	
	杨凌	0.37	0.00	0.09	0.07	0.21	0.07	0.14	0	
小计	19.13	4.74	3.35	3.62	7.22	1.34	5.88	0		
12 个县级城市	7.39	0.76	1.29	0.56	4.69	0.87	3.82	0		
6 个工业园区	1.72	0.00	0.00	0.09	1.59	0.38	1.13	0.08		
总计	28.25	5.51	4.64	4.28	13.50	2.59	10.83	0.08		

注: 宝鸡市就近采用了石头河供水进行了水源置换, 因此为引汉济渭间接供水区。

## 4 结 语

调水工程水资源优化配置是一个复杂的多目标优化问题, 本文针对引汉济渭调水工程受水区的实际情况, 基于大系统分解协调理论建立了受水区水

资源优化配置模型, 得到了受水区水资源优化配置成果, 可为跨流域调水工程受水区水资源优化配置提供一定的理论方法支撑, 对高效利用水资源具有重要的指导意义。

(下转第 54 页)

**参考文献:**

- [1] 徐良辉. 跨流域调水模拟模型的研究[J]. 东北水利水电, 2001, 19(6): 1-3.
- [2] 王宏江. 跨流域调水系统研究与实践[J]. 中国水利, 2004, (11): 11-13.
- [3] 李人厚, 邵福庆. 大系统的递阶与分散控制[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [4] 陈雷. 实行最严格的水资源管理制度, 保障经济社会可持续发展[J]. 人民论坛, 2009, (6): 10-12.
- [5] 尹明万, 谢新民, 王浩, 等. 基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置模型[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 5-8.
- [6] 粟晓玲, 康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 128-132.
- [7] 杨晓茹. 陕西省引汉济渭调水工程受水区水资源优化配置研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [8] 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.
- [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报告——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.