

# 青岛市城市水资源优化配置与工程规模研究

杨丽丽<sup>1</sup>, 谢新民<sup>1</sup>, 苟新诗<sup>2</sup>, 李其峰<sup>1</sup>, 赵全升<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 青岛市水利局, 山东 青岛 266071;  
3. 青岛大学化学化工与环境学院, 山东 青岛 266071)

**摘要** 针对青岛市城市水资源总量不足、时空分布不均和同时存在资源型、工程型和污染型缺水的现实, 根据青岛市水资源条件、水源地位置和供用水规模、结构及效率, 综合考虑节水、污水处理及回用、海水淡化、产业结构调整、水库间互联互通、挖潜和洪水资源化, 以及修建一些当地水源工程、南水北调东线工程和非常规水源利用等综合措施, 构建了面向多水源、多工程、多用户、多水平年以及基于河道内生态环境需水的水资源优化配置模型, 并通过长系列逐月调算和对比分析, 给出了不同时空尺度(以年或月为时间尺度, 以所辖区、计算单元为空间尺度)的水资源配置方案和配置工程规模, 为青岛市构建较完备的安全供水保障体系提供重要依据。

**关键词** 水资源优化配置; 配置方案; 工程规模; 青岛市

中图分类号: TV213.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2010)04-0025-05

**Optimal allocation and project scale of urban water resources in Qingdao** // YANG Li-li<sup>1</sup>, XIE Xin-min<sup>1</sup>, GOU Xin-shi<sup>2</sup>, LI Qi-feng<sup>1</sup>, ZHAO Quan-sheng<sup>3</sup> (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Qingdao Water Resources Bureau, Qingdao 266071, China; 3. College of Chemistry / Chemical Engineering / Environment, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract** : With regard to the reality of insufficient and nonuniform water resources in time and space and water shortage of resources-type, project-type and pollution-type in Qingdao, the water saving, sewage treatment and recycling, seawater desalination, industry structural adjustment, connection and cooperation between reservoirs, floodwater utilization, new or extension projects, Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion, and unconventional water utilization projects were comprehensively considered according to the conditions of water resources, the water source sites as well as the scale, structure and efficiency of water supply and utilization. An optimal allocation model of water resources with multi-source, multi-project, multi-user and multi-year based on the eco-environmental water demand in river channels was established. Through the calculation and comparative analysis of long-time series data, the allocation schemes and project scales of water resources in Qingdao under different space-time scales (taking years and months as the time scale and districts and cells as the space scale) were proposed. It would provide important foundation for establishing the complete and safe water supply system in Qingdao.

**Key words** : water resources optimal allocation; allocation scheme; project scale; Qingdao City

在全国实行从传统水利向现代水利、可持续发展水利转变的大环境下, 按照科学发展观和生态文明建设的总体要求, 针对青岛市水资源总量不足、时空分布不均, 且存在不同程度的污染, 水资源供需矛盾日益突出, 城市供水安全与生态环境保护面临严峻挑战的现实, 迫切需要对水资源的开发利用以及水利工程的布局与规模进行统一管理和科学配置, 以促进青岛市水安全保障体系建设, 保障青岛市经济社会的协调、健康和可持续发展。

多年来, 国内外对水资源优化配置的研究伴随

着数学规划和模拟技术的发展取得了不少成果, 如从量到质, 从地表水到地表水与地下水联合调度以及流域内或跨流域的水资源优化配置<sup>[1-5]</sup>。但由于研究范围和投入力量的限制, 各类研究通常以具体问题为导向, 应用范围有限。本文以青岛市城市水资源为例, 构建了基于河道内与河道外生态环境需水的水资源优化配置模型, 研制和开发了集数据库、模型库和人机交互界面等于一体的水资源优化配置模型计算软件。利用世界银行和美国 GAMS 公司研制的通用数学模型系统(GAMS)对该模型进行求解

计算,既能提供以年为时间尺度、以青岛市为空间尺度的水资源宏观配置成果,为水资源开发战略提供科学依据,又能够提供以月为时间尺度、以计算单元为空间尺度、以具体水利工程和不同行业用水户为分析对象的水资源微观配置成果,为青岛市构建较完备的供水安全保障体系提供重要依据。

# 1 青岛市水资源基本状况

青岛市共有大小河流 224 条,流域面积大于 100 km<sup>2</sup> 的河流有 33 条。河流按水系分为:大沽河、北胶莱河及沿海诸河三大水系。青岛市多年平均年降水量为 688.2 mm;当地水资源总量为 22.1 亿 m<sup>3</sup>;人均水资源量为 295 m<sup>3</sup>/人。随着青岛市工业和城市的快速发展,产生了大量的工业废水和生活污水。主城区沿岸废污水排放量巨大且集中,城市污水处理设施建设严重滞后,导致大量废污水直接排入河库,造成水资源不同程度的污染。

青岛市客水资源量主要包括通过跨流域调水工程引入的水量和由天然河道流入境内的河川径流量两部分。其中入境客水资源主要包括大沽河、小沽河、洙河、吉利河和潮河的过境水量,多年平均水量为 0.6 亿 m<sup>3</sup>,现状年引黄济青工程给青岛市的最大供水规模为 34 万 m<sup>3</sup>/d,未来挖潜后可实现最大供水规模 40.8 万 m<sup>3</sup>/d;2010 年、2020 年、2030 年引江水量分别为 1.3 亿 m<sup>3</sup>、3.0 亿 m<sup>3</sup>、6.0 亿 m<sup>3</sup>。

由此可见,尽管青岛市当地水资源比较贫乏,但通过引黄和引江水工程相继建成通水,可极大地缓解青岛市用水紧张的局面。只要妥善解决好当地水与外调水、传统水源与非传统水源、节水与治污和开源之间的关系,完全有条件满足青岛市 21 世纪经济社会可持续发展对水资源的需求,为城市发展提供安全的饮用水保障。

# 2 配置模型

## 2.1 建模思路

首先对研究区域进行概化,主要表现在建立网络图和数据整理分析,通过供水渠道把水库、水厂、取水口等供水点和计算单元的用水点联系起来。然后建立优化配置模型,把水资源配置系统中的各种未知量作为决策变量,并将其复杂关系表示成决策变量之间的线性约束方程组,将水资源配置目标表示成线性目标函数,通过 GAMS 函数进行模型模拟,并对约束函数进行调整,求出最优解。

## 2.2 系统概化与网络图

水资源配置系统内的各类物理元素(如水平衡计算单元、水利工程、河道、渠道交汇点)之间通过线

段(河、渠道、管道)的相互连接形成水资源配置系统网络。系统概化包括确定系统计算分区、选择重要水利工程、划分可利用水源、设置控制性节点或断面、区分用水户分类、河流渠道系统、河网概化等。青岛市水资源配置系统概化为由 10 个计算单元、28 条河流、4 个大型水库、18 个中型水库、2 个调水渠道、2 个规划引水枢纽、35 个水厂、10 个污水处理厂、5 个海水淡化厂及 206 条供排水渠道等组成。系统概化网络见图 1。

## 2.3 模型的构成

### 2.3.1 目标函数

该模型采用系统缺水总量最少作为优化配置的目标,以尽可能满足社会、经济、生态环境等方面的用水需求。经济方面主要是工业、建筑业与第三产业供水以及农业用水等;生态环境方面主要是河道内生态环境水量需求、河流外生态环境及水景观用水需求,以及地下水超采限制等;社会方面主要是考虑满足城镇生活和农村人畜用水需求。

模型目标函数:

$$\min W = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M k(m) W_d(t, n, m) \quad (1)$$

式中:W 为系统的缺水总量;k(m)为第 m 个用水行业的权重;W<sub>d</sub>(t, n, m)为第 t 个时段第 n 个计算单元的第 m 个行业的缺水量。

### 2.3.2 约束条件

#### a. 水库库容平衡方程

$$\begin{aligned} V(i, t) = & V(i, t-1) + \\ & \sum_{u_1(i)} C_1[u_1(i)]I[u_1(i), t] + \\ & \sum_{u_1(i)} C_2[u_1(i)]A[u_1(i), t] + \\ & \sum_{u_2(i)} C_3[u_2(i)]O[u_2(i), t] - \\ & \sum_{d_1(i)} \{I[d_1(i), t] + A[d_1(i), t]\} - \\ & \sum_{d_2(i)} O[d_2(i), t] - [P(i) + S(i)] \cdot \\ & \frac{1}{2} [V(i, t-1) + V(i, t)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中:V(i, t)为第 i 个水库 t 时段的蓄水量;u<sub>1</sub>(i), d<sub>1</sub>(i)分别为第 i 个水库上游和下游地表水河流渠道相关参数;u<sub>2</sub>(i), d<sub>2</sub>(i)分别为第 i 个水库上游和下游弃水及污水排放河流渠道相关参数;I[u<sub>1</sub>(i), t], A[u<sub>1</sub>(i), t], O[u<sub>2</sub>(i), t]分别为水库上游引水渠道、河道和排水渠道的入库水量;C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>分别为对应渠道输水有效系数;I[d<sub>1</sub>(i), t], A[d<sub>1</sub>(i), t], O[d<sub>2</sub>(i), t]分别为水库下游引水渠道、河道和排水渠道的出库水量;P(i)和 S(i)分别为水库的蒸发和渗漏系数。



$$\begin{aligned}
&F(k,t) + \sum_{u_1(k)} Y_1[u_1(k)]N_1[u_1(k),t] + \\
&\sum_{u_1(k)} Y_2[u_1(k)]N_2[u_1(k),t] + \\
&\sum_{u_2(k)} Y_3[u_2(k)]N_3[u_2(k),t] - \\
&\sum_{d_1(k)} \sum_m M_1[d_1(k),m,t] - \\
&\sum_{d_2(k)} M_2[d_2(k),t] = 0 \quad (4)
\end{aligned}$$

式中： $F(k,t)$ 为  $t$  时段  $k$  个节点以上的天然汇流； $u_1(k),d_1(k)$ 分别为第  $k$  个节点上、下游地表水河流渠道相关参数； $u_2(k),d_2(k)$ 分别为第  $k$  个节点上、下游弃水及污水排放河流渠道相关参数； $N_1,N_2$ 和  $N_3$  分别为节点上游引水渠道、河道和排水渠道汇入节点的水量； $Y_1,Y_2,Y_3$  为对应的渠道输水有效系数； $M_1$  为  $t$  时段节点  $k$  供给相应单元的  $m$  行业的水量； $M_2$  为  $t$  时段节点  $k$  的下泄水量。

d. 非零约束、上下限约束等略。

## 2.4 方案设置与模型求解

根据不同水平年经济社会发展指标和生态环境保护目标、需水定额，分别给出未来不同水平年 5 种需水方案，见表 1。

| 方案名称 | 经济增长情况 |      |      | 节水情况 |      |
|------|--------|------|------|------|------|
|      | 高速增长   | 适度增长 | 低速增长 | 适度节水 | 强化节水 |
| 方案Ⅰ  | ✓      |      |      | ✓    |      |
| 方案Ⅱ  |        | ✓    |      | ✓    |      |
| 方案Ⅲ  |        |      | ✓    | ✓    |      |
| 方案Ⅳ  | ✓      |      |      |      | ✓    |
| 方案Ⅴ  |        | ✓    |      |      | ✓    |

根据青岛市开源、治污与节流并重的水资源总体配置思路，分析和确定水资源配置各种组合方案。其中具体的组合方案设置见表 2。

青岛市城市水资源配置模型，是通过建立水资源循环转化与配置平衡方程、计算单元的水资源供用耗排平衡方程、水利工程调度供水平衡方程及各类约束方程和以供水净效益最大及损失水量最小为目标函数的数学规划模型。由上述所描述的约束条件及目标函数的形式可知，水资源优化配置模型的

| 工程名称         | 近期 | 中期 | 远期 |
|--------------|----|----|----|
| 白马河枢纽工程      | ✓  | ✓  | ✓  |
| 沐官岛水库        | ✓  | ✓  |    |
| 官路水库         | ✓  | ✓  | ✓  |
| 亭兰水库         | ✓  | ✓  |    |
| 北墅—产芝水库联调工程  | ✓  | ✓  | ✓  |
| 胶河—山洲水库联调工程  | ✓  | ✓  | ✓  |
| 高格庄—产芝水库联调工程 | ✓  | ✓  | ✓  |
| 产芝—堤湾水库输水工程  | ✓  | ✓  | ✓  |
| 黄同—尹府水库联调工程  | ✓  | ✓  | ✓  |
| 黄山—尹府水库联调工程  | ✓  | ✓  | ✓  |
| 甜水河—白马河联调工程  |    | ✓  | ✓  |
| 产业结构调整       | ✓  | ✓  | ✓  |
| 节水工程         | ✓  | ✓  | ✓  |
| 污水处理回用工程     | ✓  | ✓  | ✓  |
| 海水淡化工程       | ✓  | ✓  | ✓  |

注：表中工程包含其配套输水工程，即输水管道、泵站和输配水枢纽等。近期指 2015 年前，中期指 2016—2025 年，远期指 2025 年后。

求解是一个线性规划问题，利用世界银行和美国 GAMS 公司研制的 Windows GAMS 2.50 软件开发的计算软件系统对模型进行优化求解计算，通过不断地迭代来求得最优解，以实施城市水资源供需平衡模型的各项任务。

## 3 计算结果分析

利用上述构建的水资源配置模型和所开发的计算软件，通过对各种组合方案的长系列逐月调算，得出青岛市不同组合方案、不同水平年、不同保证率的水资源配置结果。其中主要计算结果见表 3。

从表 3 中可以看出，配置方案Ⅰ、方案Ⅱ、方案Ⅳ 2030 年青岛市城市总体缺水深度比较大，保证率  $P=95\%$  条件下缺水深度分别为 13.43%、7.00% 和 7.32%。而配置方案Ⅲ和方案Ⅴ， $P=95\%$  条件下城市基本不缺水。因此，可将配置方案Ⅲ和方案Ⅴ作为推荐的水资源配置方案。

根据引黄济青工程和南水北调东线工程分配给青岛市的引黄指标、长江分水指标，以及不同方案下各用水单元引黄与引江供水量（含从水源工程到用水单元的沿途输水损失水量），同时扣除水源工程（棘洪滩水库、官路水库、亭兰水库）蒸发渗漏损失水

| 方案名称 | 2010 年 |      |      |         |          | 2020 年 |      |      |         |          | 2030 年 |       |      |         |          |
|------|--------|------|------|---------|----------|--------|------|------|---------|----------|--------|-------|------|---------|----------|
|      | 需水量    | 供水量  |      | 缺水<br>量 | 缺水<br>深度 | 需水量    | 供水量  |      | 缺水<br>量 | 缺水<br>深度 | 需水量    | 供水量   |      | 缺水<br>量 | 缺水<br>深度 |
|      |        | 当地水  | 外调水  |         |          |        | 当地水  | 外调水  |         |          |        | 当地水   | 外调水  |         |          |
| 方案Ⅰ  | 6.19   | 3.64 | 2.49 | 0.06    | 1.00     | 12.45  | 6.71 | 4.53 | 1.21    | 9.72     | 19.92  | 10.01 | 7.23 | 2.67    | 13.43    |
| 方案Ⅱ  | 5.87   | 3.44 | 2.40 | 0.03    | 0.43     | 10.34  | 5.64 | 4.15 | 0.55    | 5.31     | 14.58  | 7.16  | 6.40 | 1.02    | 7.00     |
| 方案Ⅲ  | 5.50   | 3.26 | 2.24 | 0.00    | 0.00     | 8.39   | 5.18 | 3.21 | 0.00    | 0.00     | 10.36  | 6.17  | 4.19 | 0.00    | 0.00     |
| 方案Ⅳ  | 5.85   | 3.45 | 2.37 | 0.03    | 0.48     | 10.63  | 5.79 | 4.28 | 0.56    | 5.31     | 15.64  | 7.86  | 6.63 | 1.15    | 7.32     |
| 方案Ⅴ  | 5.55   | 3.31 | 2.24 | 0.00    | 0.00     | 8.85   | 5.41 | 3.44 | 0.00    | 0.00     | 11.50  | 6.73  | 4.77 | 0.00    | 0.00     |

量,可获得不同配置方案的政府预留水量指标。具体分析结果见表4。

| 方案名称 | 2010年 |      | 2020年 |      | 2030年 |      |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|      | 引黄水量  | 引江水量 | 引黄水量  | 引江水量 | 引黄水量  | 引江水量 |
| 方案Ⅰ  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  |
| 方案Ⅱ  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.1  |
| 方案Ⅲ  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.5  | 0.0   | 2.3  |
| 方案Ⅳ  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  |
| 方案Ⅴ  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.3  | 0.0   | 1.8  |

从表4中可以看出,不同配置方案的政府预留黄河水量指标均为零;而政府预留长江水量指标额度则差别比较大,到2030年方案Ⅰ的长江水量指标全部用完,而方案Ⅲ和方案Ⅴ则尚余2.3亿m<sup>3</sup>和1.8亿m<sup>3</sup>引江水量指标可作为青岛市政府预留水量或战略储备水源,满足青岛市未来重大发展战略调整等新增用水需求,保障青岛市未来可持续发展的供水安全。

根据水资源供需分析结果和政府预留水量指标等对比分析,建议将配置方案Ⅴ作为青岛市城市水资源配置推荐方案,其相应的工程规模为推荐工程规模。具体结果见表5和表6。

表5 规划水源开发工程

| 工程名称    | 总库容/<br>万 m <sup>3</sup> | 兴利库容/<br>万 m <sup>3</sup> | 供水区域<br>(对象)    | 设计规模/<br>(万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |     |     |
|---------|--------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|-----|-----|
|         |                          |                           |                 | 近期                                            | 中期  | 远期  |
| 白马河拦河枢纽 |                          |                           | 旺山水厂<br>(沐官岛水库) | 4                                             | 4   | 4   |
| 沐官岛水库   | 9700                     | 9050                      | 五水厂             | 0                                             | 12  | 12  |
| 官路水库    | 7500                     | 6860                      | 市内六区            | 21                                            | 21  | 21  |
|         |                          |                           | 黄岛区             | 8                                             | 8   | 8   |
|         |                          |                           | 胶州市             | 1                                             | 1   | 1   |
|         |                          |                           | 即墨市             | 1                                             | 1   | 1   |
| 亭兰水库    | 23000                    | 20000                     | 市内六区            |                                               | 19  | 37  |
|         |                          |                           | 黄岛区             |                                               | 18  | 38  |
|         |                          |                           | 胶州市             |                                               | 1   | 5   |
|         |                          |                           | 即墨市             |                                               | 1   | 1   |
| 污水处理厂   |                          |                           |                 | 99                                            | 177 | 254 |
| 污水回用工程  |                          |                           |                 | 16                                            | 38  | 58  |
| 海水淡化工程  |                          |                           |                 | 12                                            | 24  | 34  |

注:官路水库和亭兰水库属于引江工程。

表6 规划水源联调工程

| 工程名称         | 输水距离/<br>km | 设计流量/<br>(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 输水对象  | 新增供水能力/<br>(万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |
|--------------|-------------|---------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------|
| 北墅—产芝水库联调工程  | 2.0         | 30.0                                        | 产芝水库  | 3.5                                             |
| 胶河—山洲水库联调工程  | 16.4        | 5.0                                         | 山洲水库  | 2.0                                             |
| 高格庄—产芝水库联调工程 | 8.0         | 10.0                                        | 产芝水库  | 1.0                                             |
| 黄同—尹府水库联调工程  | 12.9        | 12.5                                        | 尹府水库  | 3.5                                             |
| 黄山—尹府水库联调工程  | 4.0         | 5.0                                         | 尹府水库  | 1.0                                             |
| 甜水河—白马河联调工程  |             |                                             | 沐官岛水库 | 3.6                                             |

注:除甜水河—白马河联调工程启用时间为中期外,其余工程的启用时间均为近期。

4 结 论

针对青岛市水资源特点和建设环境友好型、资源节约型社会的实际需求,根据人与自然的和谐规划理念,构建了面向多水源、多工程、多用户、多水平年并基于河道内生态环境需水的水资源优化配置模型,为节水、挖潜、非常规水利用、外调水等多种措施的综合运用提供集成平台。从水资源合理配置角度出发,利用所研制的水资源配置模型和计算软件进行不同组合方案长系列逐月调算和对比分析,最后优选出水资源配置推荐方案和规划工程规模,即2010年、2020年和2030年保证率95%条件下城市水资源供需平衡,总供水量分别为5.55亿m<sup>3</sup>、8.85亿m<sup>3</sup>、11.50亿m<sup>3</sup>。其中2030年当地水供水量为3.38亿m<sup>3</sup>,非常规水供水量为3.35亿m<sup>3</sup>,外调水供水量为4.77亿m<sup>3</sup>,尚有1.80亿m<sup>3</sup>引江水量指标作为政府预留水量或战略储备水源。到2030年将新建4座水源开发工程(白马河拦河枢纽工程、沐官岛水库、官路水库和亭兰水库),总库容为4.05亿m<sup>3</sup>,设计能力达到128万m<sup>3</sup>/d;污水处理及中水回用工程新增设计规模179万t/d和48.5万t/d,海水淡化工程新增设计规模32.5万t/d,新建6座水源联调工程,新增供水能力为14.6万m<sup>3</sup>/d。该成果为青岛市未来25年时间跨度的水资源优化配置和工程布局、实施步骤等提供科学依据,也为我国其他地区和流域开展类似工作提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 陈守煜,周惠成.多阶段多目标系统的模糊优化决策理论与模型[J].水电能源科学,1991,9(1):9-17.  
[2] 贺北方,周丽,马细霞,等.基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J].水电能源科学,2002,20(3):10-12.  
[3] 王浩,王建华,秦大庸.流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J].水科学进展,2004,15(1):123-128.  
[4] 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.  
[5] 李庆航,付湘,梅亚东,等.武汉市中心城区水资源的优化配置[J].水利水电科技进展,2007,27(2):69-72.

(收稿日期:2009-10-30 编辑:方宇彤)

