

文章编号: 1007- 7588( 2006) 05- 0088- 07

# 南水北调东线受水区水资源优化配置模型

张 平<sup>1</sup>, 赵 敏<sup>2</sup>, 郑垂勇<sup>1</sup>

(1. 河海大学商学院, 南京 210098; 2. 河海大学水利经济研究所, 南京 210098)

**摘 要:** 南水北调东线工程是我国南水北调总体布局中的重要组成部分, 对其水资源进行优化配置将缓解受水区的水资源短缺问题及促进该区域的社会经济发展。根据南水北调工程东线受水区的特点, 将其划分为 3 个子区、5 个用水部门, 选用国内生产总值最大、区域总缺水最小、区域重要污染物排放量最小为目标, 以水源可供水量、水源至用户的输水能力、用户需水量、区域协调发展等为约束条件, 结合水源供水次序系数、用户用水公平系数、需水量、水源供水量等参数, 共同构成了该区域的水资源优化配置模型。通过对模型的计算结果进行分析发现, 在 2010 年和 2030 年, 南水北调东线工程受水区的各用水部门中, 生活、环境、航运、工业用水都可以满足, 只有农业用水出现短缺; 南水北调工程东线受水区水资源利用与经济发展协调度较好, 而经济发展与环境保护之间的协调较差, 整个区域资源、经济、环境的协调性一般。

**关键词:** 水资源; 优化配置; 南水北调

1972 年联合国人类环境会议指出, “石油危机之后, 下一个危机是——水”。水资源危机, 作为一个超越政治和国界的问题, 已在全世界敲起了警钟。如何对有限的水资源进行优化配置, 已成为国内外学者日益重视的课题。以水资源系统分析为手段、水资源合理配置为目的的各类研究工作, 始于 20 世纪 40 年代 *Masse* 提出的水库优化调度问题。50 年代以后, 随着系统分析理论和优化技术的引入, 以及 60 年代计算机技术的发展, 水资源系统模拟模型技术得以迅速研究应用。进入 80 年代后期, 随着水资源研究中新技术的不断出现和水资源量与质统一管理理论研究的不断深入, 水资源量与质统一管理方法的研究也有了较大发展。尤其是决策支持技术、模拟优化技术和资源价值定量方法等的应用, 使得水资源量与质量管理方法的研究产生了更大的活力<sup>[1~8]</sup>。90 年代以来新的优化算法, 如遗传算法 (GA)、模拟退火 (SA) 等, 在水资源优化的应用中发挥重要作用。在国内, 水资源优化配置研究是随着系统工程理论的发展、应用和经济社会发展对水资源的需求特点变化而展开的。尤其是自 80 年代初, 水资源优化配置问题在我国学术界已引起足够重视, 我国开展了水资源科学分配方面的研究和应用

工作。特别是在水资源优化配置的基本概念、优化目标、基本平衡关系、需求管理、供水管理、水质管理、经济机制、决策机制几个主要模型的数学描述等方面, 均有新的研究成果, 经广泛应用取得了较大的经济效益和社会效益<sup>[9]</sup>。南水北调东线工程是我国南水北调总体布局中的重要组成部分, 如何对其水资源系统进行合理运行、科学调度和有效管理, 保证工程实现其规划目标、获得最大综合效益, 是一个非常有意义的课题。

## 1 南水北调东线工程受水区概况

南水北调东线受水区分布有淮河、海河、黄河流域 25 座地市级以上城市。包括天津、济南、青岛、徐州等特大和大城市及沧州、衡水、聊城、德州、滨州、烟台、威海、淄博、潍坊、东营、枣庄、济宁、菏泽、泰安、扬州、淮安、宿迁、连云港、蚌埠、淮北、宿州等大中城市, 县级市及县城 108 个<sup>[10]</sup>。这些城市都存在不同程度的缺水, 多数以开采深层地下水和挤占农业水源补充城市供水。

南水北调东线工程的基本任务是从长江下游取水, 主要为天津市、黄淮海平原东部和山东半岛补充水源, 与引黄工程和南水北调中线工程一起共同解决华北地区水资源短缺问题, 实现这一地区水资源

收稿日期: 2005- 12- 16; 修订日期: 2006- 03- 20

基金项目: 国家社会科学基金项目( 编号: 02BJY102)。

作者简介: 张平( 1977~ ), 女, 江苏连云港人, 博士生, 主要从事水资源技术经济及管理方面的研究。

E-mail: oceansky999@sina.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的合理配置<sup>[11]</sup>。

南水北调东线工程是我国南水北调总体布局中的重要组成部分,规划从江苏省扬州附近长江干流引水,利用京杭大运河及其平行河道输水逐级提水北送。连通洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖,在位山附近通过倒虹隧洞穿过黄河,利用卫运河、南运河等河道自流到天津,新建、扩建千顷洼、大屯、大浪淀、北大港等四处调蓄水库。从长江到天津北大港水库输水主干线全长 1 156 km,其中黄河以南 646 km,穿黄段 17 km,黄河以北 493 km;为解决山东半岛严重缺水的状况,向济南、青岛、烟台、威海等城市供水,输水线路总长 701 km<sup>[12]</sup>。工程实施后可基本解决天津市、河北省黑龙港运东地区、山东鲁北、鲁西南和胶东部分城市的水资源紧缺问题,并具备向北京供水的条件。促进环渤海地带和黄淮海平原东部经济发展,改善因缺水而恶化的环境;为京杭运河济宁至徐州段的全年通航保证了水源;使鲁西和苏北两个商品粮基地得到巩固和发展。

## 2 南水北调东线受水区水资源优化配置模型的建立

### 2.1 子区划分与水源、用户组成

设研究区域可分为  $K$  个子区,某子区用  $k$  表示。南水北调东线工程的供水范围大致分为 3 片:

①黄河以南:江苏省里下河地区以外的苏北地区和里运河东西两侧地区,安徽省蚌埠市、淮北是以及沿淮、沿新汴河、沿高邮湖地区和山东省南四湖、东平湖地区; ②山东半岛; ③黄河以北:淀东清南天津平原,河北省黑龙港东部平原,运东平原和山东省徒骇河平原(简称黄河以南、山东半岛和黄河以北)。因此,南水北调东线受水区划分为 3 个子区,即  $k = 1, 2, 3$ 。

区域的供水水源根据其供水的空间范围可划分为共用水源和专用水源。共用水源指能同时向区域内两个以上子区的需水部门供水的水源,一般包括大型的蓄、引水工程;跨流域(区域)调水工程等;专用水源指仅能为区域内一个子区的需水部门供水的水源,一般包括子区内的蓄、引、提水工程;地下水;污水再利用等。设研究区域内有  $c(c = 1, 2, \dots, M)$  个共用供水水源,第  $k$  子区有  $i(i = 1, 2, \dots, I(k))$  个专用水源。区域的用水一般可分为工业生产用水、农业生产用水、生活用水和生态环境用水几大类,根据区域实际,每一类也可分为若干具体的用水

部门。设第  $k$  子区有  $j(j = 1, 2, \dots, J(k))$  个用水部门。受水区供水水源有南水北调工程调水、地下水与地表径流。可以明显地看出,南水北调工程水资源为子区的公用水源,地下水为各子区的独立水源。当地地表径流尽管也可以跨区使用,但受资料限制和为了计算方便,这里也按独立水源对待,即  $M = 1, I(k) = 2$ 。在每个子区中,根据用水部门的行业性质,将用水部门分为五大类:生活用水、环境用水、航运用水、工业用水和农业用水,即  $J(k) = 5$ 。

### 2.2 目标函数

目标 1(经济效益):选用国内生产总值最大作为主要经济效益目标,同时这个指标也部分反映了社会方面的效果。即全区国内生产总值  $GDP$  最大,用  $f_1(X)$  表达:

$$f_1(X) = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j \in GDP(j)} fgdp_j^k(x_j^k) \quad (1)$$

水资源规划与管理中常采用  $GDP$  和用水量之间的线性关系表示,即:

$$f_1(X) = \max \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{i=1}^{I(k)} \sum_{j \in GDP(j)} (B_j^k \cdot x_{ij}^k \cdot GDP C_j) + \sum_{c=1}^M \sum_{j \in GDP(j)} (B_j^k \cdot x_{cj}^k \cdot GDP C_j) \right] \quad (2)$$

式中:  $fgdp_j^k(x_j^k)$  为  $j$  部门  $GDP$  与用水量的关系函数;  $GDP(j)$  为对  $GDP$  有贡献的用水部门集合;  $x_j^k$  为系统分配给  $k$  子区  $j$  部门的总用水量;  $B_j^k$  为  $k$  子区  $j$  部门单位水量产值系数。对工业用水部门可用万元产值用水定额推求;对农业用水部门可用灌溉定额和灌溉增产效益推求;  $x_{ij}^k$  为  $i$  独立水源分配给  $k$  子区  $j$  用水部门的水量;  $x_{cj}^k$  为  $i$  公共水源分配给  $k$  子区  $j$  用水部门的水量;  $GDP C_j$  为  $j$  部门  $GDP$  占产值的比例系数。可用区域经济统计资料推求。

目标 2(社会效益):以区域总缺水量最小来表示

$$\min f_2(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} [D_j^k - (\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k)] \quad (3)$$

式中:  $D_j^k$  为  $k$  子区  $j$  用户需水量( $\times 10^4 m^3$ )。鉴于社会效益目标更不易度量,而区域缺水量的大小或缺水程度影响到社会发展与安定,因此,以区域总缺水量最小作为社会效益目标的间接度量。

目标 3(环境效益):区域重要污染物排放量最

小

$$\min f_3(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(K)} d_j^k p_j^k (\sum_{i=1}^{I(K)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k) \quad (4)$$

式中:  $d_j^k$  为  $k$  子区  $j$  用户单位废水排放量中重要污染因子的含量(mg/l), 一般可用化学需氧量 COD 等水质指标来表示;  $p_j^k$  为  $k$  子区  $j$  用户污水排放系数。

2.3 模型约束条件

(1) 水源可供水量约束:

公共水源 
$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(K)} x_{cj}^k \leq W_c \quad (5)$$

独立水源 
$$\sum_{j=1}^{J(K)} x_{ij}^k \leq W_i^k \quad (6)$$

式中:  $W_c$  为公共水源  $c$  的可供水量( $\times 10^4 m^3$ );  $W_i^k$  为  $k$  子区独立水源  $i$  的可供水量( $\times 10^4 m^3$ );

(2) 水源至用户的输水能力约束

公共水源 
$$x_{cj}^k \leq Q_{cmax}^k \quad (7)$$

独立水源 
$$x_{ij}^k \leq Q_{imax}^k \quad (8)$$

式中:  $Q_{cmax}^k$  为公共水源  $c$  至  $k$  子区的最大输水能力( $\times 10^4 m^3$ );  $Q_{imax}^k$  为  $k$  子区  $i$  水源至  $k$  子区  $j$  用户的最大输水能力( $\times 10^4 m^3$ )

(3) 用户需水量约束

$$U_{jmin}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \leq U_{jmax}^k \quad (9)$$

式中:  $U_{jmin}^k$  为  $k$  子区  $j$  用户的最小需水量( $\times 10^4 m^3$ );  $U_{jmax}^k$  为  $k$  子区  $j$  用户的最大需水量( $\times 10^4 m^3$ )

(4) 区域协调发展约束

$$\mu = \sqrt{\mu_{B1}(\sigma_1) \cdot \mu_{B2}(\sigma_2)} \geq \mu^* \quad (10)$$

式中:  $\mu$ 、 $\mu^*$  分别为区域协调发展指数及其最低值;  $\mu_{B1}(\sigma_1)$ 、 $\mu_{B2}(\sigma_2)$  分别表示水资源利用与区域经济发展的协调度、经济发展与水环境质量改善的协调度。

区域协调发展包括水资源利用与经济发展、经济发展与环境改善两方面, 分别用供需水量比值、人均 GDP 增长与污染物排放量增长的比值来反映, 并假定区域协调发展指数最低值为 0.8。

(5) 变量非负约束:

$$x_{ij}^k, x_{cj}^k \geq 0 \quad (11)$$

2.4 参数的确定

(1) 子区水源供水次序系数( $\alpha_i^k$ )、用户用水公平系数( $\beta_j^k$ )。 $\alpha_i^k$  是指  $k$  子区  $i$  水源相对其它水源供水的优先程度, 与水源供水次序有关。 $\alpha_i^k$  的数值可参照下式确定:

$$\alpha_i^k = \frac{1 + \frac{n_{max}^k - n_i^k}{I(k)+M}}{\sum_{i=1}^{I(k)+M} [1 + \frac{n_{max}^k - n_i^k}{I(k)+M}]} \quad (12)$$

式中:  $n_i^k$  为  $k$  子区  $i$  水源供水次序序号;  $n_{max}^k$  为  $k$  子区水源供水次序序号最大值。

用户用水公平系数  $\beta_j^k$  是指  $k$  子区  $j$  用户相对其它用户优先得到供给的重要性程度。 $\beta_j^k$  与用户优先得到供给的次序有关, 其计算与  $\alpha_i^k$  的计算相仿。

$$\beta_j^k = \frac{1 + \frac{n_{max}^k - n_j^k}{J(k)}}{\sum_{j=1}^{J(k)} [1 + \frac{n_{max}^k - n_j^k}{J(k)}]} \quad (13)$$

式中:  $n_i^k$  为  $k$  子区  $j$  部门用水次序序号;  $n_{max}^k$  为  $k$  子区部门用水次序序号最大值。

依照公平性原则, 在经济目标中考虑用户公平系数  $\beta_j^k$ , 反映某用户相对于其他用户优先得到供水的重要性程度。按照“先生活、后生产”的原则和可持续发展原则, 水源分配要在优先满足人民生活饮水的前提下, 保持水资源环境可持续发展, 统筹安排工、农业生产和其他用水。由此拟定各用户得到供水的次序先后为: 生活用水、环境用水、航运用水、工业用水、农业用水。参照公式(12), 计算得到各用户的公平系数分别为: 0.33、0.27、0.20、0.13、0.07。

各子区水源供水次序系数采用类似方法确定。各子区供水水源有当地地表水、当地地下水和南水北调工程调水, 目前南水北调工程受水区的地下水严重超采, 必须严格控制地下水的利用数量。以南水北调工程的调水代替目前地下水超采量, 涵养地下水源, 一部分地下水可作为年内季节性调节或年际丰枯调节的水源, 大部分地下水应作为战略性储备水源, 以备持续特殊枯水年应急之用<sup>[13]</sup>。因此本文拟定的用水顺序是各子区当地地表水、南水北调工程调水和当地地下水。参照公式(12) 计算可以得到各水源的供水次序系数为 0.5、0.3、0.17。

(2) 需水量及其上下限。随着社会经济的发展, 南水北调东线工程受水区 2010 水平年总需水量为  $518.39 \times 10^8 m^3$ , 其中黄河以南为  $228.70 \times 10^8 m^3$ , 黄河以北为  $149.77 \times 10^8 m^3$ , 山东半岛  $139.92 \times 10^8 m^3$ ; 2030 水平年需水量为  $567.81 \times 10^8 m^3$ , 其中黄河以南为  $251.09 \times 10^8 m^3$ , 黄河以北为  $159.48 \times 10^8 m^3$ , 山东半岛  $157.24 \times 10^8 m^3$ , 各省需水详细状况见表 1<sup>[14]</sup>。

(3) 各水源可供水量。预计南水北调东线工程受水区 2010 水平年总供水量为  $407.61 \times 10^8 m^3$ , 其中黄河以南为  $188.42 \times 10^8 m^3$ , 黄河以北为

104.62×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 山东半岛 114.57×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 2030 水平年供水量为 438.19×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 其中黄河以南为 202.59×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 黄河以北为 109.08×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 山东半岛 126.52×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 表中“外调水”不包括南水北调工程供水, 各区域需水详细状况见表 2<sup>[5]</sup>。

东线工程主要利用河道输水, 并采取逐级建设泵站提水北送, 在输水渠道和输水动力两方面都相对比较机动。因此, 东线工程合理调水规模可以依据受水区不同时段的水需求在一定幅度内进行灵活调整。根据东线工程的实际具体特性, 推荐南水北调东线工程调水规模 2010 年为 66×10<sup>8</sup>~75×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 2030 年为 96×10<sup>8</sup>~105×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。本文为计算简便, 选择南水北调东线工程调水规模 2010 年为 70×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 2030 年为 100×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

表 1 南水北调东线工程受水区需水预测

| Table 1 Demand of water resources in the east route of the South-to-North Water Transfer Project (×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) |      |       |       |      |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|------|--------|--------|--------|
| 受水区                                                                                                                                 | 水平年  | 生活    | 环境    | 航运   | 工业     | 农业     | 合计     |
| 黄河以南                                                                                                                                | 2010 | 29.30 | 2.35  | 5.10 | 50.57  | 141.38 | 228.70 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 41.37 | 3.25  | 5.10 | 69.18  | 132.19 | 251.09 |
| 山东半岛                                                                                                                                | 2010 | 22.16 | 4.43  | 0.00 | 26.24  | 87.09  | 139.92 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 29.61 | 6.48  | 0.00 | 36.09  | 85.06  | 157.24 |
| 黄河以北                                                                                                                                | 2010 | 20.03 | 2.21  | 0.00 | 18.99  | 108.54 | 149.77 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 28.34 | 2.80  | 0.00 | 23.57  | 104.77 | 159.48 |
| 受水区合计                                                                                                                               | 2010 | 71.49 | 8.99  | 5.10 | 95.80  | 337.01 | 518.39 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 99.32 | 12.53 | 5.10 | 128.84 | 322.02 | 567.81 |

表 2 南水北调东线受水区供水量

| Table 2 Supply of water resources in the east route of the South-to-North Water Transfer Project (×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) |      |        |        |        |        |      |      |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|------|------|--------|
| 水资源分区                                                                                                                               | 水平年  | 地表水    | 外调水    | 地下水    | 污水及雨洪水 | 海水利用 | 微咸水  | 可供水量合计 |
| 黄河以南                                                                                                                                |      |        |        |        |        |      |      |        |
|                                                                                                                                     | 江南北调 | 2010   | 86.88  | 41.85  | 2.83   | 0.00 | 0.00 | 131.56 |
|                                                                                                                                     | 供水系统 | 2030   | 92.90  | 45.08  | 1.88   | 0.00 | 0.00 | 139.86 |
|                                                                                                                                     | 南四湖东 | 2010   | 19.33  | 5.50   | 28.80  | 3.23 | 0.00 | 56.86  |
|                                                                                                                                     | 平湖地区 | 2030   | 20.60  | 5.50   | 29.08  | 7.55 | 0.00 | 62.73  |
|                                                                                                                                     | 合计   | 2010   | 106.21 | 47.35  | 31.63  | 3.23 | 0.00 | 188.42 |
|                                                                                                                                     |      | 2030   | 113.50 | 50.58  | 30.96  | 7.55 | 0.00 | 202.59 |
| 山东半岛                                                                                                                                | 2010 | 34.97  | 24.79  | 45.43  | 7.94   | 1.44 | 0.00 | 114.57 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 36.44  | 24.79  | 46.04  | 17.20  | 2.05 | 0.00 | 126.52 |
| 黄河以北                                                                                                                                | 2010 | 21.10  | 47.70  | 26.20  | 4.98   | 1.14 | 3.50 | 104.62 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 21.10  | 47.70  | 26.20  | 6.98   | 2.10 | 5.00 | 109.08 |
| 合计                                                                                                                                  | 2010 | 162.28 | 119.84 | 108.26 | 16.15  | 2.58 | 3.50 | 407.61 |
|                                                                                                                                     | 2030 | 171.04 | 123.07 | 108.20 | 31.73  | 4.15 | 5.00 | 438.19 |

将上述 3 个目标和各种约束条件组合在一起, 即构成区域水资源优化配置的大系统多目标总体模型, 如下所示:

$$F(X) = opt\{f_1(X), f_2(X), f_3(X)\}$$
$$= \begin{cases} f_1(X) = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j \in GIP(j)} fgd p_j^k(x_j^k) \\ f_1'(X) = \min [ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{I(k)} \sum_{j=1}^{J(k)} d_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^M \sum_{j=1}^{J(k)} d_{cj}^k x_{cj}^k \\ \quad + \sum_{js=1}^{JS} g_{js} + \sum_{ws=1}^{WS} g_{ws} ] \\ f_2(X) = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} [ D_j^k - ( \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k ) ] \\ f_3(X) = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} d_j p_j^k ( \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k ) \end{cases}$$

(14)

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq W_c \\ \sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq W_i^k \\ x_{ij}^k \leq Q_{cmax}^k \\ x_{ij}^k \leq Q_{imax}^k \\ U_{jmin}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^M x_{cj}^k \leq U_{jmax}^k \\ \mu = \sqrt{1_{B1}(\sigma_1) \cdot 1_{B2}(\sigma_2)} \geq \mu^* \\ x_{ij}^k, x_{cj}^k \geq 0 \\ \alpha_i^k = \frac{1 + \frac{n_{max}^k - n_i^k}{n(k)+M}}{\sum_{i=1} [1 + \frac{n_{max}^k - n_i^k}{n(k)}]} \\ \beta_j^k = \frac{1 + \frac{n_{max}^k - n_j^k}{n(k)}}{\sum_{j=1} [1 + \frac{n_{max}^k - n_j^k}{n(k)}]} \end{cases}$$

(15)

式中: c=1, 2, ..., M; k=1, 2, 3; i=1, 2, ..., I(k); j=1, 2, ..., J(k)。

3 模型求解结果及分析

根据上述水资源优化配置模型, 使用 C++ 语言编制基于遗传算法的模型求解程序。输入已知数据及各项参数, 运行程序, 可得出研究区两个规划水平年(2010 年、2030 年)情况下的水资源优化配置方案(表 3、表 4)。

对该成果进行分析, 得出以下结论:

- (1) 2010 年南水北调工程东线受水区需水量为 518.39×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 缺水量为 40.78×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 缺水率(缺

表 3 2010 水平年研究区水资源优化配置方案

Table 3 Water resources optimal allocation scheme of the research areas in 2010 ( $\times 10^8\text{m}^3, \%$ )

| 受水区  | 用水行业 | 地表水    | 南水北调  | 地下水    | 合计     | 缺水量   | 缺水率   |
|------|------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| 黄河以南 | 生活   | 14.65  | 9.67  | 4.98   | 29.30  | 0.00  | 0.00  |
|      | 环境   | 1.18   | 0.78  | 0.39   | 2.35   | 0.00  | 0.00  |
|      | 航运   | 2.55   | 1.68  | 0.87   | 5.10   | 0.00  | 0.00  |
|      | 工业   | 29.10  | 12.87 | 8.60   | 50.57  | 0.00  | 0.00  |
|      | 农业   | 109.31 | 0.00  | 16.79  | 126.10 | 15.28 | 10.81 |
|      | 合计   | 156.79 | 25.00 | 31.63  | 213.42 | 15.28 | 6.68  |
| 山东半岛 | 生活   | 11.08  | 7.31  | 3.77   | 22.16  | 0.00  | 0.00  |
|      | 环境   | 2.22   | 1.46  | 0.75   | 4.43   | 0.00  | 0.00  |
|      | 航运   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
|      | 工业   | 14.55  | 7.23  | 4.46   | 26.24  | 0.00  | 0.00  |
|      | 农业   | 41.29  | 0.00  | 36.45  | 77.74  | 9.35  | 10.74 |
|      | 合计   | 69.14  | 16.00 | 45.43  | 130.57 | 9.35  | 6.68  |
| 黄河以北 | 生活   | 10.02  | 6.61  | 3.40   | 20.03  | 0.00  | 0.00  |
|      | 环境   | 1.11   | 0.73  | 0.37   | 2.21   | 0.00  | 0.00  |
|      | 航运   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
|      | 工业   | 9.50   | 6.27  | 3.22   | 18.99  | 0.00  | 0.00  |
|      | 农业   | 57.79  | 15.39 | 19.21  | 92.39  | 16.15 | 14.88 |
|      | 合计   | 78.42  | 29.00 | 26.20  | 133.62 | 16.15 | 10.78 |
| 总计   |      | 304.35 | 70.00 | 103.26 | 477.61 | 40.78 | 7.87  |

表 4 2030 水平年研究区水资源优化配置方案

Table 4 Water resources optimal allocation scheme of the research areas in 2030 ( $\times 10^8\text{m}^3, \%$ )

| 受水区  | 用水行业 | 地表水    | 南水北调   | 地下水    | 合计     | 缺水量   | 缺水率   |
|------|------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 黄河以南 | 生活   | 20.69  | 13.65  | 7.03   | 41.37  | 0.00  | 0.00  |
|      | 环境   | 1.63   | 1.07   | 0.55   | 3.25   | 0.00  | 0.00  |
|      | 航运   | 2.55   | 1.68   | 0.87   | 5.10   | 0.00  | 0.00  |
|      | 工业   | 36.82  | 20.60  | 11.76  | 69.18  | 0.00  | 0.00  |
|      | 农业   | 109.94 | 0.00   | 10.48  | 120.42 | 11.77 | 8.90  |
|      | 合计   | 171.63 | 37.00  | 30.96  | 239.59 | 11.77 | 4.69  |
| 山东半岛 | 生活   | 14.81  | 9.77   | 5.03   | 29.61  | 0.00  | 0.00  |
|      | 环境   | 3.24   | 2.14   | 1.10   | 6.48   | 0.00  | 0.00  |
|      | 航运   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
|      | 工业   | 18.05  | 11.91  | 6.13   | 36.09  | 0.00  | 0.00  |
|      | 农业   | 44.38  | 0.18   | 33.78  | 78.34  | 6.72  | 7.90  |
|      | 合计   | 80.48  | 24.00  | 46.04  | 150.52 | 6.72  | 4.27  |
| 黄河以北 | 生活   | 14.17  | 9.35   | 4.82   | 28.34  | 0.00  | 0.00  |
|      | 环境   | 1.40   | 0.92   | 0.48   | 2.80   | 0.00  | 0.00  |
|      | 航运   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
|      | 工业   | 11.79  | 7.78   | 4.00   | 23.57  | 0.00  | 0.00  |
|      | 农业   | 55.52  | 20.95  | 16.90  | 93.37  | 11.40 | 10.88 |
|      | 合计   | 82.88  | 39.00  | 26.20  | 148.08 | 11.40 | 7.15  |
| 总计   |      | 334.99 | 100.00 | 103.20 | 538.19 | 29.89 | 5.26  |

水量/需水量)为 10.87%,只有农业用水有不同程度的缺水。其中,黄河以南、山东半岛、黄河以北 3 个子区缺水量分别为  $15.28 \times 10^8\text{m}^3$ ,  $9.35 \times 10^8\text{m}^3$ ,  $16.15 \times 10^8\text{m}^3$ , 缺水率分别为 6.68%, 6.68% 和 10.78%。2030 年与 2010 年相比,南水北调工程东线受水区需水量为  $567.81 \times 10^8\text{m}^3$ , 缺水量为  $29.89 \times 10^8\text{m}^3$ , 缺水量减少了  $10.89 \times 10^8\text{m}^3$ , 缺水率为 5.26%,同样只有农业用水有不同程度的缺水。其中,黄河以南、山东半岛、黄河以北 3 个子区缺水量分别为  $11.77 \times 10^8\text{m}^3$ ,  $6.72 \times 10^8\text{m}^3$ ,  $11.4 \times 10^8\text{m}^3$  缺水率分别为 4.69%, 4.27% 和 7.15%。

(2) 对全区各用水部门而言,生活、环境、航运、工业用水都可以满足,只有农业用水出现短缺。2010 年,黄河以南、山东半岛、黄河以北 3 个子区农业用水缺水率分别为 10.81%, 10.74% 和 14.88%; 到 2030 年,3 个子区农业用水缺水率分别为 8.90%, 7.90% 和 10.88%,这也是模型中设置用户公平系数的一种体现。

(3) 所建立的南水北调工程东线受水区水资源优化配置模型,是多目标优化问题,配置成果是经济、社会、环境 3 个目标之间的均衡解,体现了协同发展原则,因此它与常规的仅以缺水量最小为目标的供需水平衡分析是有区别的。所求得的 3 个目标值,是南水北调工程东线受水区水资源优化配置效益的反映:供水经济效益反映了优化配置后水资源对区域经济发展的贡献;缺水量关反映了优化配置后,该区域的供需水平衡情况;COD 排放量与各用水部门的污水排放系数和污染物浓度有关,反映了该区域的水环境质量和水污染治理效果。

(4) 根据南水北调工程东线受水区社会经济预测,  $\mu_{B1}(\sigma_1)$  在优化配置模型中,求得区域的协调情况为:水资源利用与经济发展的协调度  $\mu_{B1}(\sigma_1) = 0.921$ ; 经济发展与环境保护的协调度  $\mu_{B2}(\sigma_2) = 0.739$ ; 整个区域的协调发展指数,  $\mu = 0.825$ 。可见,南水北调工程东线受水区水资源利用与经济发展协调度较好,而经济发展与环境保护之间的协调较差,整个区域资源、经济、环境的协调性一般。

(5) 本文对南水北调工程东线受水区水资源优化配置建立了模型,由于资料条件的限制,仅利用南水北调工程东线受水区 2010 年和 2030 年的需水量预测资料,以及各水源供水能力对模型进行了验证,从而给出该年的优化配置方案。当资料、信息条件以及模型参数改变时,仍可运行已编制的计算机程

序,进行模型求解。因此,所建模型和设计的求解算法具有一定的适用性和可操作性。

#### 4 结论与对策

本文运用多目标规划模型对南水北调工程东线受水区水资源优化配置进行了系统分析,发现南水北调东线工程建成后,2010 年和 2030 年东线受水区仍有不同程度的缺水,但是缺水部门都集中在农业用水上。而且,南水北调工程东线受水区水资源利用与经济发展协调度较好,而经济发展与环境保护之间的协调较差,整个区域资源、经济、环境的协调性一般。可见南水北调工程并不能完全解决受水区水资源短缺问题,水资源的供需矛盾在将来仍然存在。面对这一现实,从长远和本质上解决东线受水区的水资源问题,我们应从以下几方面入手:

(1) 倡导现代地面灌溉技术模式。我国现有灌溉面积  $0.53 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 其中地面灌溉占 95% 以上。由于农田土地平整程度差,田间灌溉工程规格不合理、地面灌溉技术落后、灌溉管理粗放等问题,致使我国地面灌溉的田间水利利用率不高。通过应用水平畦田灌溉、波涌灌溉及喷、微灌等高效节水灌溉技术,可以大幅度减少地面灌溉过程中的水量损失浪费。这对改变我国地面灌溉的落后状况、从整体上缓解农业水资源短缺的矛盾、促进灌溉农业的可持续发展具有重要的现实意义。

(2) 加快节水型城市建设。首先,鼓励社会公众参与节水,积极开展节水宣传教育,增强全民节水的自觉性。其次,加强节水工程建设,进行节水技术改造,提高用水效率。开展农业节水工程建设,进行工业节水技术改造,全面推行各种节水技术、设备和器具。工程措施包括农业节水示范项目、灌区及工业节水改造、城镇供水设施改造、海水及微咸水利用、集雨设施建设、工业及生活废污水减排处理和回用、引水冲污工程及河道清淤等。最后,建立稳定的节水投入保障机制和良性的节水激励制度。确立节水投入的专项资金。从水资源费、超计划、超定额加价水费和排污费等收费中提取一定比例资金,作为节水管理专项资金。通过节水专项奖励、财政补贴、减免有关事业性收费等政策,鼓励和支持节水技术发展。

(3) 调整产业结构,实现优化配置。大力推进生态工业园区建设,把转变经济增长方式、推行清洁生产同结构调整、技术进步和企业管理结合起来,实现从末端治理为主向全过程管理为主的转变,促进节

能降耗、资源综合利用。大力发展水资源能够得到充分、高效利用的循环型或清洁型产业,以高新技术改造传统用水工艺,使重点行业及产品的单位耗水量逐步达到国际先进水平,电力、煤炭等行业逐步实现废水零排放。缺水地区要严格限制发展高耗水、高污染工业项目发展,运用行政、经济等措施引导高耗水行业逐步向水资源丰富地区转移。造纸、石油、化工、医药、粮食深加工等高污染行业要通过工艺挖潜与技术改造,降低和减少污水排放,提高水资源利用效率,降低环境危害。

#### 参考文献 (References):

- [1] Lee, D. J., R. E. Howitt, M. A. Marino. A stochastic Model water quality: application to salinity in the Colorado River [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(3): 475~ 483.
- [2] Lefkof L. J., Gorelick S. M. Simulating physical progress and economic behavior in Saline, irrigated agriculture: Model development [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 917~ 926.
- [3] Antle J. M., S. M. Capallo. Physical and economic model integration for measurement of environmental impacts of agriculture chemical use [J]. *Agric. Resour. Econ.*, 1991, 20(3): 62~ 68.
- [4] Baumol W. J., W. E. Oates. The theory of Environmental Policy [M]. New York: Cambridge University Press, 1993.
- [5] Bayer, M. B. A modeling method for evaluating water quality policies in non-serial river system [J]. *Water Resources Bulletin*, 1997, 33(6): 1141~ 1151.
- [6] T. B. Culver, C. A. Shoemaker. Optimal control for groundwater remediation by differential dynamic programming with quasi-newton approximations [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(4): 612~ 620.
- [7] John C. Bergstrom, Kevin J. Boyle, Charles A. Job. Assessing the economic benefits of ground water for environmental policy decisions [J]. *Water Resources Bulletin*, 1996, 32(2): 221~ 230.
- [8] Jay Davis, George William Sherck, Donald Phelps. Influencing water legislative development: What to do and what to avoid [J]. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(4): 632~ 640.
- [9] 李雪萍. 国内外水资源优化配置研究概述 [J]. *海河水利*, 2002(5): 13~ 15. [LI Xue-ping, Research summarization of water resources optimal allocation in home and abroad [J]. *Haihe Water Resources*, 2002, (5): 13~ 15.]
- [10] 李庆林, 王蓓. 南水北调东线工程输水线路布置 [J]. *水利规划与设计*, 2005, (1): 17~ 20. [LI Qing-lin, WANG Bei. Water transportation route collocation of the east route in the South-to-North Water Transfer Project [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2005, (1): 17~ 20.]
- [11] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 216~ 218. [WANG Hao, QING Da-yong, WANG Jian-hua et al. *Water Resources Optimal Allocation of Yellow River, Huai River and Hai River Drainage Areas* [M].

- Beijing: Science Press, 2003. 216~ 218. ]
- [ 12] 水利部淮河水利委员会、水利部海河水利委员会. 南水北调东线工程规划(2001修订)简介[J]. 中国水利, 2003, (1): 43~ 47. [ HUI River Commission, HAI River Commission. Brief programming introduction of the east route in the south-to-north water transfer project(2001)[J]. *China Water Resources*, 2003, (1): 43~ 47. ]
- [ 13] 汪易森, 杨元月. 中国南水北调工程[J]. 人民长江, 2005, (7): 2~ 5. [ WANG Yi-sen, YANG Yuan-yue. South-to-north water transfer project of China[J]. *Yangtze River*, 2005, (7): 2~ 5. ]
- [ 14] 李善同, 许新宜. 南水北调与中国发展[M]. 北京: 经济科学出版社, 2004. 268~ 269. [ LI Shan-tong, XU Xin-yi. South-to-North Water Transfer Project and Development of China[M]. Beijing: Economy and Science Press, 2004. 268~ 269. ]

## Optimal Allocation of Water Resources in the Water Import Areas of the East Route of the South-to-North Water Transfer Region

ZHANG Ping<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>2</sup>, ZHENG Chui-yong<sup>1</sup>

(1. Business School of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Economy Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** South-to-North water transfer project is to realize the water resources optimal allocation in our country in 21<sup>st</sup> century. How to layout the project is a very significant issue. The east-route project is a very important part of the South-to-North Water Transfer Project. By reviewing the current researches in this field both at home and abroad, the paper makes a detailed and systematic study on the water resources optimal allocation of the water imported areas of the east route in the South-to-North water transfer project. Water resources optimal allocation can solve the problem of water shortage and promote the development of society and economy in the area. Based on the character of the water imported areas of the east route of South-to-North water transfer project, this paper divides the area into 3 zones, that is, the south of the Yellow River, the Shandong peninsula and the north of the Yellow River as well as 5 departments for water use (the life department, the environment department, the ship department, the industry department and the agriculture department). GDP, water shortage, water contamination, water supply, transportation ability, water demand and harmony development etc were taken into account in the process of establishing the water resources optimal allocation model. The model is established based on Particle Swarm Optimizer. The results showed that there is a water shortage for agriculture use in 2010 and 2030. The water shortage of the south of the Yellow River, the Shandong peninsula and the north of the Yellow River is  $15.28 \times 10^8 \text{m}^3$ ,  $9.35 \times 10^8 \text{m}^3$  and  $16.15 \times 10^8 \text{m}^3$  in 2010, respectively. The water shortage of the south of the Yellow River, the Shandong peninsula and the north of the Yellow River is  $11.77 \times 10^8 \text{m}^3$ ,  $6.72 \times 10^8 \text{m}^3$ ,  $11.4 \times 10^8 \text{m}^3$  in 2030, respectively. It is obvious that the South-to-North water transfer project cannot resolve the problem of water shortage in the imported areas entirely. The conflict of water supply and demand will still exist in future. To resolve the problem in the imported areas, suggestions are proposed as following: Firstly, extend water-saving irrigation modes in order to mitigate water demand for agriculture use. Secondly, through water pricing system to decrease urban water use. Lastly, regulate the industrial structure and upgrade water use efficiency.

**Key words:** Water resources; Optimal allocation; South-to-North Water Transfer Project