

# 丰台区水资源耦合配置模型研究

陈义忠, 何理, 卢宏伟, 李晶

(华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206)

**摘要:**以丰台区水资源配置系统为研究对象,在分析供需水的基础上,构建双层优化模型,其中从环境角度体现对污染物排放量的严格控制,从经济角度体现区域水资源系统经济效益最大化。最终,体现区域水资源数量和质量统一和不同需水部门之间的合理配置,并达到环境目标和经济目标的集成化。基于模糊满意度算法求解模型,模型结果表明:丰台区各规划水平年的供水量基本上可以满足各用户的需求要求,其中南水北调工程将在区域水资源配置系统中发挥重要作用。进一步地将双层规划模型和两个传统的单目标优化模型的结果进行对比分析,以期在不同决策者提供的规划方案。

**关键词:**水资源配置; 双层优化; 模糊满意度; 单目标优化; 南水北调工程

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)06-0019-07

## Coupling allocation model of water resources in Fengtai district of Beijing

CHEN Yizhong, HE Li, LU Hongwei, LI Jing

(Renewable Energy Academy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Taking Fengtai district as a study object on basis of analyzing water supply and demand, the paper constructed a bi-level optimization model so as to embody the strict control of pollutant emissions from an environmental point of view, and the maximal economic benefit of water resources system from an economic point of view. Finally the unity of quantity and quality of water resources and coordinative allocation of water resources among multi sectors have been achieved. Also, the integrated targets of economy and environment have been realized. The results show that water supply of each planning year in Fengtai district basically can meet the requirement every consumer. The south-to-north water transfer project can play a significant role in the regional allocation system of water resources. It further compared and analyzed the result between bi-level plan model and the two conventional single-objective models so as to provide decision scheme in different scenarios for different makers.

**Key words:** water resources allocation; bi-level optimization; fuzzy possibilistic approach; single-objective optimization; south-to-north water transfer project

丰台区地处北京市西南部,由于地表水年际来水不均,地下水开采受限和南水北调工程水资源有限以及入京后的再分配等问题,加剧了区内需水部门和配水部门之间的矛盾。此外,由于不合理的用水结构和低效的污水处理能力,丰台区水环境质量面临严峻考验。据丰台区2013环境质量报告书统计,全区主要河流的水环境质量处于重污染状态,各河流现状水质类别均为劣V类,均不符合相应功能水质标准。因此,建立合理的水资源配置方案,协调

供需矛盾和改善水环境质量已成为研究的重点<sup>[1-5]</sup>。

区域水资源优化配置实质上是从分配效率和利用效率上提高水资源的配置,其目的在于促进地区社会、经济、环境的全面协调发展<sup>[6]</sup>。目前的水资源配置大多考虑多目标规划方法。文静等(2012)<sup>[7]</sup>基于多目标决策方法建立以系统经济成本和缺水量最小化为目标函数的五家渠市水资源优化配置模型;王宏伟等(2012)<sup>[8]</sup>利用多目标遗传算

收稿日期:2015-06-27; 修回日期:2015-08-01

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(51222906); 国家自然科学基金项目(41271540); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0791); 中央高校基本科研项目

作者简介:陈义忠(1989-),男,福建连江人,硕士,主要从事环境系统优化方面的研究。

通讯作者:何理(1976-),男,湖南株洲人,博士,教授,研究方向:地下水污染与控制、土壤修复、能源与城市环境总体规划等。

法对西宁市的水资源优化配置进行研究;Qi Hong-hai 等(2012)<sup>[9]</sup>采用多目标优化方法对区域农业系统的水质进行管理,模型结果可以在保障水质和系统经济效益的前提下,实现对水体富营养化和沉积物的有效控制。虽然多目标优化方法能够考虑水资源配置的综合效益,但是其忽略了社会、经济、环境间的相互联系和相互制约的层次关系。例如,从环境效益角度出发,决策者倾向于尽可能减少水量使用以降低污水的排放量,而水资源配置的经济效益往往受限于环境压力,并在环境的约束下,希望更多的水量用于区域经济发展。为解决水资源配置中的层次关系,适宜采用双层优化<sup>[10-11]</sup>。双层规划研究的是上、下层决策者之间按有序的方式进行相互作用,上层优先给定决策,下层在此基础上按自身利益给出反应并反馈给上层决策者,上层决策者根据下层的反应制定全局最佳方案。

基于以上分析,本文在对在丰台区未来水资源供需预测的基础上,从不同决策者角度出发,开发水资源数量和质量优化配置的双层模型。另一方面,随着南水北调工程的正式开通,其对北京市以及各区县的供水格局将产生重大影响,以丰台区为例,可以侧面考察这一工程的实际意义。

## 1 丰台区水资源供需分析

丰台区水资源供需分析主要依据丰台区历年统计年鉴、《丰台区“十二五”时期水资源保护与节约利用规划》<sup>[12]</sup>及近几年丰台区现状用水水平、社会经济发展和产业结构调整进行。

### 1.1 水资源供给分析

丰台区的水资源供应主要有地表水、地下水、再生水和南水北调水源。其中,地表水主要包括自来水和雨洪水;地下水主要为自备井水。区内的自来水供应主要来自北京市政大管网,共计5座供水厂,实际年供应量达到11 798万 $\text{m}^3$ ;根据丰台区下垫面的类型和分布面积,估算出在多年年平均降雨量为578 mm的条件下,全区年雨水利用潜力将达到300万 $\text{m}^3$ ;区内自备井的年供水能力范围预计在2 500万~5 000万 $\text{m}^3$ ;截止2011年,全区共有4座再生水厂,2009年向丰台供应再生水2 689万 $\text{m}^3$ ,而卢沟桥和小红门再生水正在建设,在“十二五”期间将正式投入运行,届时再生水的年供应量将有望突破5 000万 $\text{m}^3$ ;南水北调水源于2014年正式入京,年供水量约为105 000万 $\text{m}^3$ ,预计其中的5%~10%可供丰台区利用,将大大缓解丰台区的水资源严重

短缺的势态。

### 1.2 水资源需求分析

丰台区需水量主要包括农业、工业、第三产业(三产)、城市生活和生态环境需水。随着丰台区城市建设和国民经济发展以及产业结构调整,未来区内用水结构将会有所调整。因此,选取2015、2020、2025、2030年为水平年,对未来需水格局进行预测分析。

1.2.1 农业需水量 丰台区农业用水需求主要包括灌溉需水量、畜牧需水量。2011年的农业用水量为583万 $\text{m}^3$ ,占总用水量的4.0%。随着城市发展,人口规模扩大,农业灌溉面积将有所增加,同时考虑全区节水灌溉面积的扩大和对畜牧养殖规模的控制,假定农业用水需求年均增长率7.5%,预计2015、2020、2025、2030年的农业需水量将分别达到819万、1 123万、1 518万和2 045万 $\text{m}^3$ 。

1.2.2 工业需水量 丰台区2011年工业用水量为1 886万 $\text{m}^3$ ,占总用水量13%,工业万元GDP水耗为30 $\text{m}^3$ 。近几年,丰台区加强工业节水工程投入,预计规划期内的工业万元GDP用水量将下降至11~15 $\text{m}^3$ ,而产业结构的调整进一步削减工业的产业比重,预计2015、2020、2025、2030年全区工业年GDP将分别达到175.0亿、255.1亿、379.5亿、550亿元,则相应的工业需水量将分别达到1 745万、2 555万、3 803万、5 498万 $\text{m}^3$ 。

1.2.3 三产需水量 三产是丰台区产业结构的主体。三产2011年的用水量达到3 100万 $\text{m}^3$ ,占总用水量的21%,万元GDP水耗为4.2 $\text{m}^3$ 。预计2015、2020、2025、2030年的三产的年GDP将分别达到880亿、1 345亿、2 028亿、2 980亿元。假定三产万元GDP水耗维持2011年的水平不变,则规划期内三产的需水量将分别达到3 955万、5 355万、8 618万、12 455万 $\text{m}^3$ 。

1.2.4 城市生活需水量 城市生活用水需求包括居民生活用水量和公共用水量。2011年全区常住人口为217.0万人,生活用水量为8 740万 $\text{m}^3$ ,人均生活用水水平为110.0 L/(人·d)。城市生活需水量的预测主要基于人口规模和人均用水水平<sup>[13]</sup>。结合丰台区历年常住人口数据,设定人口年增长率为1.0%,则2015、2020、2025、2030年的人口将分别达到228.1万、239.7万、252.0万、264.8万人,人均生活用水水平以2011年水平为参考,根据实际情况作浮动变化,预计规划期内城市生活用水需求量将分别达到10 550万、12 499万、13 811万、15 250

万 m<sup>3</sup>。

1.2.5 生态环境需水量 生态环境需水主要包括城市绿化和河湖生态需水。2011 年区内的绿化用水量占总用水量的 2%。随着城市的发展和人们对生活质量要求的提高,绿地面积将不断增加,而节水灌溉技术的推广降低了单位绿地的需水量。预计规划期内绿地需水量将分别达到 328 万、448 万、608 万、745 万 m<sup>3</sup>。丰台区现有的主要河湖面积约为 228 hm<sup>2</sup>,全区河湖生态需水量约为 7 400 万 m<sup>3</sup>。但考虑丰台区水资源利用情况,不能保证生态需水量在各个规划时期都得到充分满足。另外,生态补水的一个重要渠道为再生水的补给。

2 双层优化模型的建立

水资源优化的目的是为实现区域社会经济与环

境协调发展,其实现必须建立在水资源供给量与区域社会经济发展水平所对应的水资源需求量之间在时空配置上的平衡,并构成一个水资源管理配置系统(图 1),其中主要由水资源需求,水资源供给,水资源决策 3 大模块组成。水资源管理通常涵盖 3 种目标:社会目标、经济目标和生态环境目标。社会目标主要表征各行各业的缺水量最小;经济目标追求的是各用水单位净效益最大化;生态环境目标主要体现在对水体主要污染物的严格控制。由供需水量预测可知,在南水北调工程开通后,丰台区总体缺水量并不大。所以模型对社会目标暂不作分析,模型的目标函数主要包括生态环境目标 and 经济效益目标。依据丰台区发展建设要求,构建以生态环境目标为上层目标 and 经济效益目标为下层目标的双层优化模型(BLP-MC&MB)。

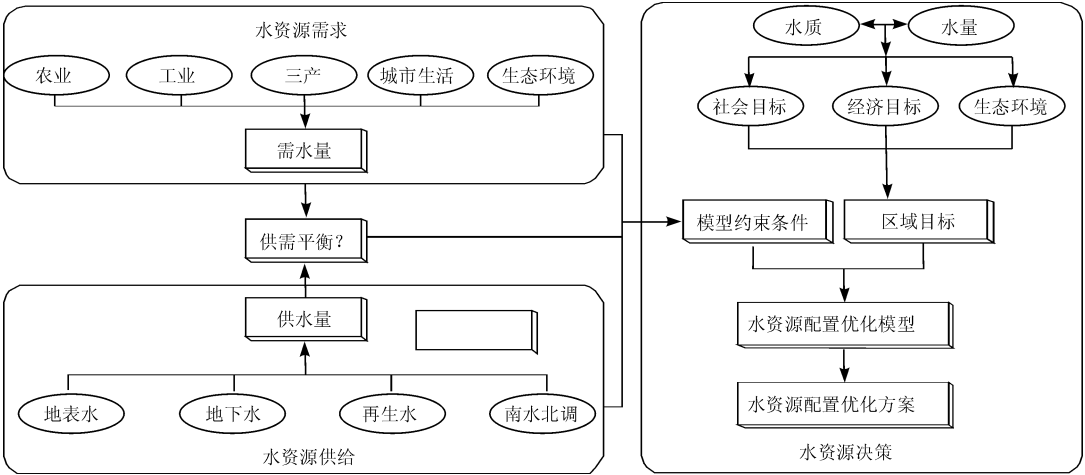


图 1 水资源管理系统

2.1 层目标函数与约束条件

以生态环境控制为上层目标,选取废水排放量中的重要污染因子 COD 含量为主要指标,以生态环境用水约束、污染物允许最大排放量为上层约束条件,具体如下:

$$\begin{cases} \min C^U = \sum_{s=1}^4 \sum_{u=1}^5 \sum_{k=1}^4 (0.01pc_u \cdot ef_u \cdot w_{s,u,k} \cdot r_{s,u}) \\ \text{s. t.} \\ \sum_{s=1}^4 w_{s,5,k} \cdot r_{s,5} \geq \sum_{s=1}^4 \sum_{u=1}^4 (w_{s,u,k} \cdot r_{s,u} \cdot \psi_{k,\min}), \forall k \\ \sum_{s=1}^4 \sum_{u=1}^5 (0.01pc_u \cdot ef_u \cdot w_{s,u,k} \cdot r_{s,u}) \leq TCD_{k,\max}, \forall k \end{cases}$$

(1)

式中: $k$  代表规划水平年, $k=1$  为 2015 年, $k=2$  为 2020 年, $k=3$  为 2025 年, $k=4$  为 2030 年; $s$  代表水

源, $s=1$  为地表水, $s=2$  为地下水, $s=3$  为再生水, $s=4$  为南水北调水; $u$  代表用水部门, $u=1$  为农业, $u=2$  为工业, $u=3$  为第三产业, $u=4$  为城市生活, $u=5$  为生态环境; $C^U$  为水资源管理配置系统的 COD 排放总量,t; $pc_u$  为  $u$  用户单位废水排放量中 COD 含量,mg/L; $ef_u$  为  $u$  用户的废水排放系数,%; $w_{s,u,k}$  为  $k$  时期  $s$  水源分配给  $u$  用户的水量,万 m<sup>3</sup>; $r_{s,u}$  为  $s$  水源与  $u$  用户供水关系,1 表示存在供水关系,0 表示无供水关系,具体详见配水原则; $TCD_{k,\max}$  为  $k$  时期 COD 最大允许排放量,t; $\psi_{k,\min}$  表征  $k$  时期生态环境用水与生产用水的最低比例,%。

2.2 下层目标函数与约束条件

下层目标函数为区域供水所带来的净经济效益最大化,约束条件包括可供水量约束、需水量约束、区域人口和经济约束,具体如下:

$$\begin{cases}
 \max B^L = \sum_{s=1}^4 \sum_{u=1}^5 \sum_{k=1}^4 (b_{u,k} - c_{u,k}) \cdot w_{s,u,k} \cdot r_{s,u} \\
 \text{s. t.} \\
 \sum_{u=1}^5 w_{s,u,k} \cdot r_{s,u} \leq W_{s,k}, & \forall s, k \\
 DW_{u,k} \cdot \omega_u^- \leq \sum_{u=1}^5 w_{s,u,k} \cdot r_{s,u} \leq DW_{u,k} \cdot \omega_u^+, & \forall u, k \\
 RES_k \cdot \beta_k^- \cdot 10^{-3} \cdot L_k \leq \sum_{s=1}^4 w_{s,4,k} \cdot r_{s,4} \leq RES_k \cdot \beta_k^+ \cdot 10^{-3} \cdot L_k & \forall u, k \\
 \sum_{u=1}^3 GDP_{u,k} \cdot 10^{-4} \cdot \xi_{u,k}^- \leq \sum_{s=1}^4 \sum_{u=1}^3 w_{s,u,k} \cdot r_{s,u} \leq \sum_{u=1}^3 GDP_{u,k} \cdot 10^{-4} \cdot \xi_{u,k}^+, & \forall u, k
 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $B^L$  为系统的净收益, 元;  $b_{u,k}$  为  $k$  时期  $u$  用户的效益系数, 元/ $\text{m}^3$ ;  $c_{u,k}$  为  $k$  时期  $u$  用户的费用系数, 元/ $\text{m}^3$ ;  $W_{s,k}$  为  $k$  时期  $s$  水源的可供水量, 万  $\text{m}^3$ ; 用水部门的需水量不是一成不变的, 可以引入需水系数的概念表征这种不确定性, 其中需水系数上限  $\omega^+$  与预测需水量的乘积为该用户的最大需水量, 需水系数下限  $\omega^-$  与预测需水量的乘积为该用户的最小需水量;  $DW_{u,k}$  为  $k$  时期  $u$  用户的用水需求, (万  $\text{m}^3$ );  $RES_k$  为  $k$  时期人口数量, 万人;  $\beta^-$ 、 $\beta^+$  分别为人均用水量下、上限,  $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ ;  $L_k$  为  $k$  时期长度,  $\text{d}$ ;  $GDP_{u,k}$  为  $k$  时期  $u$  用户 (农业、工业、第三产业) 的国民生产总值, 万元;  $\xi^-$ 、 $\xi^+$  分别为农业、工业、第三产业单位国民生产总值用水量的下、上限,  $\text{m}^3/\text{万元}$ 。

### 2.3 水资源配置原则

根据丰台区水资源开发利用规划及现状, 设定

如下配置原则:

- (1) 地表水优先用于农业灌溉, 部分用于工业、第三产业发展;
- (2) 地下水优先用于城市生活;
- (3) 再生水全部用于生态环境;
- (4) 客水主要用于满足城市生活、工业、第三产业和生态环境用水需求。

### 2.4 模型求解

BLP - MC&MB 模型中的效益系数和费用系数主要参照文献[14], 具体参数的确定是在综合规划期内不确定因素影响的基础上, 对文献数据作浮动变化而得到的, 如表 1 所示。

根据城市排水工程规划规范, 丰台区污水排放现状和借鉴文献[14], 确定规划期内农业、工业、三产、城市生活、生态环境排放的污水中的 COD 浓度

表 1 规划期内的供水效益系数和费用系数

元/ $\text{m}^3$

| 需水用户 | 2015  |      | 2020  |      | 2025  |      | 2030  |      |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|      | 效益系数  | 费用系数 | 效益系数  | 费用系数 | 效益系数  | 费用系数 | 效益系数  | 费用系数 |
| 农业   | 14.0  | 0.3  | 16.0  | 0.3  | 20.0  | 0.3  | 22.0  | 0.4  |
| 工业   | 580.0 | 2.0  | 600.0 | 2.2  | 625.0 | 2.4  | 640.0 | 2.6  |
| 第三产业 | 530.0 | 2.2  | 550.0 | 2.4  | 575.0 | 2.8  | 600.0 | 3.0  |
| 城市生活 | 500.0 | 1.6  | 520.0 | 2.0  | 550.0 | 2.3  | 565.0 | 2.5  |
| 生态环境 | 320.0 | 2.0  | 350.0 | 2.2  | 375.0 | 2.4  | 415.0 | 2.7  |

分别为 60、100、120、230、30  $\text{mg}/\text{L}$ , 相应的污水排放系数为 0.1、0.5、0.7、0.7、0.8。此外, 考虑规划期内的不确定因素影响和供小于需的现状, 确定模型中的需水系数上限为 1, 下限为 0.9。

针对双层规划模型的求解方法已经有学者进行了相关研究<sup>[15-16]</sup>, 而 BLP - MC&MB 模型将利用模糊满意度和 Lingo 软件进行求解<sup>[17-19]</sup>。为实现丰台区水资源配置原则, 在模型中纳入了能够体现水源与用户供水关系的参量 ( $r_{s,u}$ ), 在模型求解过程

中, 设有特定供水关系的  $r_{s,u}$  值为 1, 无供水关系的  $r_{s,u}$  值为 0。

具体的求解过程可概述为: 上、下层目标分别利用 Lingo 软件编程求解, 得到理想的目标值  $C_{ideal}^U$ 、 $B_{ideal}^L$ ; 通过上、下层决策者协商给定可以接受的目标值边界  $C_{bound}^U$ 、 $B_{bound}^L$ ; 分别在上、下层目标基础上建立相应的隶属度函数  $\tau^U$ 、 $\nu^L$ , 如式 (3) 所示; 最后通过协调上、下层的隶属度函数, 构建全局满意度函数  $\phi = \min\{\tau^U, \nu^L\}$ , 从而将双层优化模型转化为求全局

满意度最大 (max $\phi$ ) 的单层优化模型,通过传统的 Lingo 软件编程可得到全局最优解。

$$\tau^U = \frac{(C_{bound}^U - C^U)}{(C_{bound}^U - C^{U\ ideal})}$$
$$v^L = \frac{(B^L - B_{bound}^L)}{(B_{ideal}^L - B_{bound}^L)} \quad (3)$$

3 结果分析与讨论

3.1 BLP – MC&MB 模型的规划结果

丰台区水资源的优化配置方式如表 2 所示。在 4 个规划时段内区域配水总量分别为 24 123 万、28 807 万、34 762 万、41 152 万 m<sup>3</sup>。从供给水源分析:南水北调水将是丰台区主要的供给水源,其整个规划期内共提供水量 49 621 万 m<sup>3</sup>,占总水量的 38.5%;从缺水程度分析:丰台区各规划水平年的供水量基本可以满足各部门的需水要求,但仍然存在少量缺水现象,其中城市生活用水和生态环境用水缺水程度相对高。丰台区缺水的主要原因如下:

(1)供水能力无法与需水增长的要求相匹配,虽然南水北调工程对丰台区的缺水局面具有明显地改善作用,但第三产业和城市生活需水量却明显攀升,两者从 2015 年到 2030 年的需水量将增加近 13 200 万 m<sup>3</sup>;

(2)受管理政策、地理位置、工程设施等条件的约束,某些水源只能供给特定的需水部门,从而造成某些部门出现缺水现象。

表 3 展示了规划期内各需水部门分配水量占比。由表 3 可知,城市生活是需水量最大的部门,但其占用量有下降的趋势。与此类似,生态环境的水量比重也呈逐年下降趋势,这主要是由于生态环境用水相对恒定,而生产用水逐年大幅增加,尤其是第三产业的水资源占有量从 2015 年的 15.9% 增至 2030 年的 29.60%。以上分析表明,丰台区可以通过控制人口规模和产业结构调整来提高水资源利用。

规划期内的系统收益和污染物排放量如图 2 所示。由图 2 可得,各规划期的系统收益分别达到 1 060 亿、1 360 亿、1 750 亿、2 190 亿元;相应的 COD 排放量分别为 2.26 万、2.32 万、2.55 万、2.57 万 t,由于大部分水量用于满足城市生活需求,所以城市生活部门的经济效益和污染物排放量也是最大的,在整个规划期内,城市生活部门的经济效益和污染物排放量分别占总量的 42.3% 和 70.2%。其次,第三产业是丰台区的重点发展产业,所以相对于工业和农业,第三产业的用水将大幅增加,由此带来的

表 2 规划水平年不同需水部门水资源配置结果 万 m<sup>3</sup>

| 水平年  | 供水配置  | 不同水源用于不同需水用户的配水量 |      |       |       |      |
|------|-------|------------------|------|-------|-------|------|
|      |       | 农业               | 工业   | 第三产业  | 城市生活  | 生态环境 |
| 2015 | 地表水   | 788              | 813  | 2105  |       |      |
|      | 地下水   |                  |      |       | 5000  |      |
|      | 再生水   |                  |      |       |       | 5000 |
|      | 南水北调水 |                  | 858  | 1721  | 5389  | 2449 |
|      | 需水量   | 819              | 1745 | 3955  | 10550 | 7728 |
|      | 缺水量   | -31              | -74  | -129  | -161  | -279 |
| 2020 | 地表水   | 1112             | 1526 | 3926  |       |      |
|      | 地下水   |                  |      |       | 5000  |      |
|      | 再生水   |                  |      |       |       | 5000 |
|      | 南水北调水 |                  | 1015 | 1419  | 7256  | 2553 |
|      | 需水量   | 1123             | 2555 | 5355  | 12499 | 7848 |
|      | 缺水量   | -11              | -14  | -10   | -243  | -295 |
| 2025 | 地表水   | 1451             | 2851 | 7490  |       |      |
|      | 地下水   |                  |      |       | 5000  |      |
|      | 再生水   |                  |      |       |       | 5000 |
|      | 南水北调水 |                  | 806  | 973   | 8515  | 2676 |
|      | 需水量   | 1518             | 3803 | 8618  | 13811 | 8008 |
|      | 缺水量   | -67              | -146 | -155  | -296  | -332 |
| 2030 | 地表水   | 1947             | 4241 | 10973 |       |      |
|      | 地下水   |                  |      |       | 5000  |      |
|      | 再生水   |                  |      |       |       | 5000 |
|      | 南水北调水 |                  | 1041 | 1230  | 9377  | 2343 |
|      | 需水量   | 2045             | 5498 | 12455 | 15250 | 8145 |
|      | 缺水量   | -98              | -216 | -252  | -873  | -802 |

注:由于政策原因,某些类型的水源不允许供给某些部门,而某些类型仅供给特定部门,故为定值。

表 3 规划期内各需水部门分配水量占比 %

| 水平年    | 农业   | 工业    | 第三产业  | 城市生活  | 生态环境  |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2015 年 | 3.30 | 6.90  | 15.90 | 43.00 | 30.00 |
| 2020 年 | 3.90 | 8.90  | 18.70 | 43.00 | 25.50 |
| 2025 年 | 4.20 | 10.50 | 24.30 | 38.90 | 22.10 |
| 2030 年 | 4.70 | 12.80 | 29.60 | 34.90 | 18.00 |

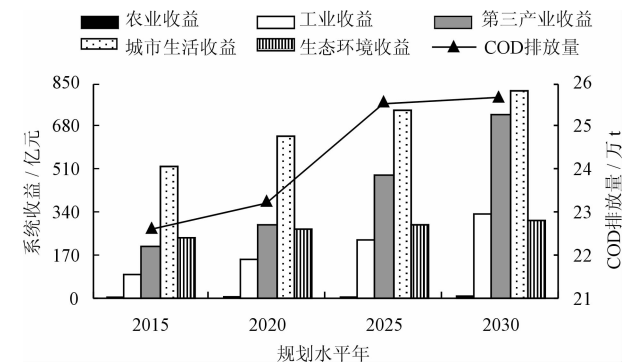


图 2 系统经济收益和污染物排放量

经济效益也迅猛提升,由 2015 年的 202 亿元攀升至 2030 年的 728 亿元;另一方面,第三产业也成为 COD 的一个主要污染源,在整个规划期内,其累计 COD 排放量达到 2.05 万 t,占总排放量的 21%。

3.2 敏感性分析

模型参数的选择对决策结果有显著影响,敏感性分析用来揭示输入因子对决策结果的影响程度。研究重点考察用户需水量变化对结果的影响,其中以前述的预测值为基准情景(BAS),同时设定两种不同的节水情景,具体如下:

情景 A:弱节水。该情景是在基准情景基础上,加强节水管理,抑制需水过快增长,其假定各用水部门的需水量在 4 个规划期内依次减少 3%、6%、8%、10%。

情景 B:强节水。该情景将大力控制用水部门的需水量,要求各用水部门在 4 个规划期内分别下降 5%、8%、12%、15%。

不同情景下的结果如图 3 所示(图中  $k$  代表规划水平年)。结果指出:较低的需水量将会产生较少的 COD 排放量,同时降低系统收益。在情景 A 条件下,丰台区水资源管理系统在整个规划期内的经济收益和 COD 排放量分别为 6 000 亿元和 9.20 万 t;在情景 B 条件下,规划期内系统经济收益和 COD 排放量分别为 5 810 亿元和 8.92 万 t。结果还表明,相比于基准情景(BAS),情景 A 平均每降低 1% 需水量,系统收益和 COD 排放量将分别减少 14.1 亿元和 255 t;情景 B 平均每降低 1% 需水量,系统收益和 COD 排放量将分别降低 13.5 亿元和 181 t。

3.3 管理政策分析与建议

分别以环境目标或经济目标为主要的目标函数,

可以建立两个传统的单目标优化模型(COD 排放量控制:LP - MC 和系统收益最大化:LP - MB)。表 4 对比 3 种模型的规划结果表明:两个单目标优化模型为丰台区的水资源配置系统提供了决策边界,相应的系统收益范围为[6160, 6460]亿元;系统配水总量范围为[125100, 131200]万 m<sup>3</sup>;COD 排放总量范围为[9.39, 9.85]万 t。其中 LP - MC 仅从保护水质角度出发,其规划的目标是希望尽可能少地使用水资源以控制污染物排放,所以该模型会得到最低的 COD 排放量,但在这种情景下,不仅降低了系统收益,还会造成各需水部门的水资源供需比偏低;相反,LP - MB 模型的规划结果能得到最高的系统收益和最大的 COD 排放量,且各部门的水资源供需比都维持在较高水平,这主要是由于 LP - MB 模型代表了配水部门的利益而忽略了环境影响;BLP - MC&MB 模型则同时考虑了经济因素和环境因素,其规划结果可以为不同层面的决策者提供更加合理的规划方案。概括而言,LP - MC 的规划结果是一种力求改善水质的最优方案;LP - MB 方案则适用于追求地区经济高速发展的情景;而当决策者对地区的环境影响和经济效益保持谨慎态度时,BLP - MC&MB 模型结果是其中一种理想的方案。

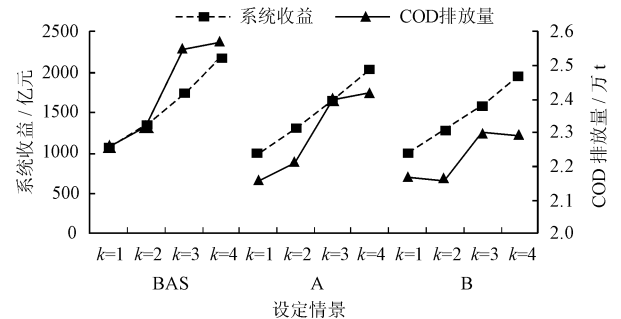


图3 不同情景对系统优化结果的影响

表4 3种模型结果综合对比

| 模型          | 配水量/万 m <sup>3</sup> | 系统收益/<br>亿元 | COD 排放<br>总量/万 t | 需水部门的水资源供需比/% |       |      |      |      |
|-------------|----------------------|-------------|------------------|---------------|-------|------|------|------|
|             |                      |             |                  | 农业            | 工业    | 三产   | 城市生活 | 生态环境 |
| LP - MC     | 125100               | 6160        | 9.39             | 99.6          | 98.5  | 93.8 | 94.2 | 90.0 |
| LP - MB     | 131200               | 6460        | 9.85             | 97.5          | 100.0 | 99.3 | 98.5 | 97.5 |
| BLP - MC&MB | 128800               | 6360        | 9.71             | 96.1          | 96.6  | 98.2 | 96.8 | 93.7 |

南水北调工程是丰台区未来主要的供给水源,这意味着如果南水北调工程减少对丰台区的水源供应,则该地区将面临着严峻的缺水局面。图 4 描绘了南水北调工程对丰台区水资源配置系统的影响。由图可知,若不考虑南水北调水源,在整个规划时段内,LP - MC 模型、LP - MB 模型和 BLP - MC&MB 模型配置方式的缺水量将分别达到 557 万、513 万、

549 万 m<sup>3</sup>;相应的经济损失为 2 410 亿、2 680 亿、2 540 亿元。所以,决策者必须将这种情景纳入到丰台区水资源规划中。当南水北调工程未能满足规划供水时,供水方面:丰台区可通过本地水资源和北京市市政供水系统来满足地区的用水需求,同时增加雨洪水的利用量,提高污水处理能力以增加再生水量,并适度使用自备井水;需水方面:通过优化产业

结构和控制人口数量,力求降低水资源需求量,可适量减少生态环境用水,在生产用水上,全面推行节水工程或设施以提高水资源利用率。当南水北调工程达到预期供应能力时,全区应严格控制开采地下水,防止地下水水位下降,合理分配常规水资源,优化产业结构,更加注重生态环境用水。

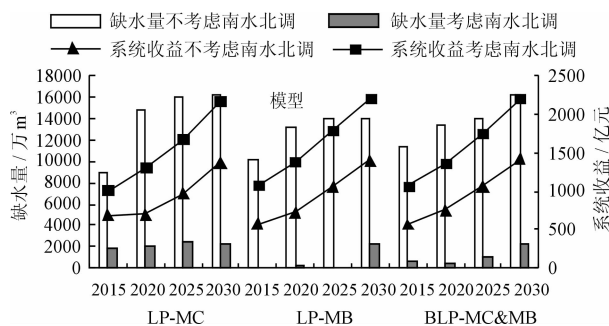


图4 南水北调工程对区域水资源配置系统的影响

## 4 结 语

在对丰台区未来水资源供需预测的基础上,从不同决策者角度出发,构建具有层次关系的双层优化模型,对该地区的水资源配置系统进行研究,体现了区域水质和水量的相统一,协调了区域内各需水部门之间的高效配水,有效地缓解了污染物排放冲突,实现了区域环境效益和经济效益的集成化。并基于模糊满意度和 lingo 软件,对区域水资源配置模型进行求解,得到最优的水资源配置方案、系统收益和 COD 排放量。敏感性分析结果指出模型参数对决策结果具有显著影响。同时将双层规划模型和两个传统的单目标优化模型的结果进行对比分析,以期为不同决策者提供不同情景下的规划方案。最后以丰台区为具体案例,验证了南水北调工程的巨大意义。

## 参考文献:

- [1] Lu Hongwei, Huang Guohe, He Li. Inexact rough - interval two - stage stochastic programming for conjunctive water allocation problems[J]. Journal of Environmental Management, 2009,91(1):261 - 269.
- [2] Li Y P, Huang G H, Xiao H N, Qin X S, et al. An inexact two - stage quadratic program for water resources planning [J]. Journal of Environmental Informatics, 2007,10(2):99 - 105.
- [3] 莫淑红,段海妮,沈冰,等. 考虑不确定性的区间多阶段随机规划模型研究[J]. 水利学报,2014,45(12):1427 - 1434.
- [4] 李小萌,何理,卢宏伟. 基于模糊可信度约束的不确定性农业水资源规划模型研究[J]. 水资源与水工程学报,

- 2014,25(4):108 - 114 + 118.
- [5] 孙炼,李春晖,贾晓丽,等. 基于 STELLA 的安徽省水资源供需预测研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):51 - 57.
- [6] 李婷贤. 基于双层规划的区域水资源优化配置问题研究[D]. 山东:山东科技大学,2013.
- [7] 文静,雷晓云,朱连勇,等. 基于多目标决策分析的五家渠市水资源优化配置研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(4):34 - 37.
- [8] 王宏伟,张鑫,邱俊楠,等. 基于多目标遗传算法的西安市水资源优化配置研究[J]. 水土保持通报,2012,32(2):150 - 153.
- [9] Qi Honghai, Altinakar M S. A conceptual framework of agricultural land use planning with BMP for integrated watershed management[J]. Journal of Environmental Management, 2012,92(1):149 - 155.
- [10] Xu Jinping, Tu Yan, Zeng Ziqiang. Bilevel optimization of regional water resources allocation problem under random environment[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013,139(3):246 - 264.
- [11] 吴丹,吴凤平. 基于双层优化模型的流域初始二维水权耦合配置[J]. 中国人口资源与环境,2012,22(10):26 - 34.
- [12] 北京市丰台区水务局. 丰台区“十二五”时期水资源保护与节约利用规划[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [13] George B, Malano H, Davidson B. et al. An integrated hydro - economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development[J]. Agricultural Water Management, 2011,98(5):733 - 746.
- [14] 雷霄. 基于多目标规划的杨凌示范区水资源优化配置[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(4):96 - 100 + 103.
- [15] He Li, Huang Guohe, Lu Hongwei. Greenhouse gas emissions control in integrated municipal solid waste management through mixed integer bi - level decision - making [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,193(20):112 - 119.
- [16] Bialas W F, Karwan M H. On two - level optimization[J]. Automation Control IEEE Transactions on, 1982,27(1):211 - 214.
- [17] Kasperski A. A possibilistic approach to sequencing problems with fuzzy parameters[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005,150(1):77 - 86.
- [18] Emam O E. A fuzzy approach for bi - level integer non - linear programming problem [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006,172(1):62 - 71.
- [19] Shih H S, L E S. A fuzzy possibilistic approach to multi - level optimization [C]. The Eighth Annual Industrial Engineering Research Conference, 1999,23 - 26.