

南水北调中线水进京后水资源高效利用配置方案研究

门宝辉¹, 吴智健, 田巍

(华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206)

摘要: 北京作为中国的首都,也是水资源紧缺的地区之一。为了有效缓解北京、天津等北方城市水资源的用水紧张问题,国家启动了南水北调工程。要改变北京市人均水资源量不断下降、地下水位持续降低、水环境污染严重的现状,必须从高效利用水资源和推广节水技术两方面入手。2014年12月南水北调中线水进京必然对当地的用水格局产生影响,因此,研究外调水进京后水资源如何高效利用具有重要的现实意义。本文通过构建有外调水两种情景下的水资源优化配置模型,以2015年为实例分析比较不同水源消耗情况和不同用户使用情况的变化,结果表明:虽然2015年北京外调水没有达到规划的10亿 m^3 ,但从生活、工业、农业和环境四类用户用水量的在各类水源中的占比来看,预测情况与实际情况基本相同,所以建立的优化配置模型具有良好的代表性。对比有外调水和无外调水条件下的优化配置方案,可以看出外调水进京后,地下水使用量显著减少了5.5亿 m^3 ,主要是减少对生活用水的供给,地表水使用量相对减少最为明显,达到了41.4%,但是供给上主要作为生活用水,而再生水对于外调水的敏感性更强,在供给上的变化相对较大。总之,对于北京而言,外调水进京后改变了当地原有水资源的消耗格局,减少地下水的消耗,减缓地下水漏斗面积的扩大,增加了城市生态环境补水,有效地提高了当地的生态环境效益,水资源的综合效益得到了全面提升,实现了水资源的高效利用。

关键词: 水资源高效利用; 优化配置; 外调水; 南水北调工程

Study on the Scheme of Efficient Utilization of Water Resources after the Water through Middle Route of South - to - North Water Transfer Project flowing into Beijing

Men baohui, Wu Zhijian, Tian Wei

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

Abstract: Beijing, as the capital of China, is also one of the areas of water shortage. In order to effectively alleviate the problems of water shortage in Beijing, Tianjin and other northern cities, the state started the South-to-North Water Diversion Project. To change the conditions that the decline in the amount of per capita water resources in Beijing, the on-going drop of groundwater level, the serious situation of water pollution, we must use the water resource efficiently and promote water saving technology. In December 2014, the water of the midline of the South-to-North Water Diversion Project flew into Beijing, which would inevitably have an impact on the function of local water. Therefore, it is of great practical significance to study how the efficient use of water resources after the transfer of water into Beijing. In this paper, we construct a model of optimal allocation of water resources under the two conditions that one includes water flowing from the South-to-North Water Diversion Project but another do not, and compare the changes of different water consumption and different users' usage. The results show that although the water transfer in Beijing in 2015 did not reach the planned 1 billion cubic meter, according to the proportion of the consumption of four types of water users-living, industry, agriculture and environment in all kinds of water source, the forecast is basically the same as the actual situation, which means that the establishment of the optimal allocation model has a good representative. Compared by the optimal allocation scheme, the use of groundwater is reduced 550 million cubic meter, mainly by reducing the supply of domestic water. The most obvious relative reduction is surface water, reaching 41.4%, but the supply of it was mainly used as domestic water, and recycled water was more sensitive to external water transfer, the change of which in supply was relatively large. In short, for Beijing, the transfer of water changes the original consumption patterns of the original water resources, reduces groundwater consumption, slows down the expansion of groundwater funnel area, increases urban ecological

¹基金资助: 国家重点研发计划资助 (Grant No. 2016YFC0401406), 华北电力大学教学名师培育计划 (第四期); 中央高校教育教学改革专项。

作者简介: 门宝辉, (1973-), 男, 教授, 主要从事水文水资源的科研与教学工作。

environment replenishment, effectively enhances the local ecology Environmental benefits, improved the comprehensive benefits of water resources has been comprehensively, which achieve the efficient use of water resources.

Key words: efficient use of water resources; optimization; the transfer of water; the South-to-North Water Diversion Project

前 言

水利部 2016 年 7 月印发《关于加强水资源用途管制的指导意见》，意见中指出各有关部门要进一步贯彻落实中央关于健全自然资源用途管制制度要求，按照“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期水利工作方针，把握好生活、生产和生态用水的关系，充分发挥水资源的多功能性，使水资源按用途得到合理开发、高效利用和有效保护。水资源高效利用狭义上是指通过一系列的工程、非工程措施实现水资源利用效率的提高，广义而言就是要通过一系列的工程、非工程措施使水资源的综合效益得到提升，这就不局限于用水效率的提高，更注重在用水效率提高基础上，实现综合效益的增加^[1]。目前国内外大量专家学者将水资源高效利用和节水技术结合起来，认为节水技术的使用和推广在一定程度上促进了水资源的高效利用。裴源生教授指出水资源高效利用比节水更具有宏观性、广泛性、综合性和整体性，对水资源高效利用的评价涉及到各个行业 and 不同领域，应采用不同模型对水资源利用状况进行模拟分析，针对不同指标不同效果推求水资源高效利用的最佳方案^[1]。李文燕等指出我国水资源的缺乏使得节约用水迫在眉睫，需要政府引导，人民群众配合，引进高科技，改善节水技术，全面应用在水资源开发利用中，提高水资源利用效率，促进可持续发展^[2]。Engler A 等提出政府应该通过改变投资政策的导向来增加水资源的储备，利用信息化的技术指导农民在灌溉过程中提高水资源的利用率^[3]；Blanke A 等提出伴随着水资源短缺的加剧，我国北方正在加快发展节水技术，但使用范围并不是很广泛，政府应该鼓励人民大范围的采用节水技术，并给予一定程度的经济支持^[4]。

从宏观上看，节水技术意味着取水量的减少，是指对各类水资源使用量的节约，水资源高效利用更注重合理配置区域水资源，依据公平、高效和可持续性的原则，利用各类措施使水资源在各类用水户之间更加科学合理地分配，解决我国不同区域，尤其是水资源稀缺的西北和华北地区的水资源供需矛盾，从而使当代社会与未来社会的经济用水与生态环境用水的相对公平、合理。从这个意义上说，节水提高了水资源的整体效率，也就是促进了水资源的高效利用。节水技术包括工程和非工程措施，合理配置区域水资源是工程措施和非工程措施的结合，也是实现水资源高效利用的重要措施之一。在节水条件下的水资源高效利用指的是在水资源使用量相同的情况下，区域或流域所能达到最高经济效益、最理想的生态环境和最能满足人类社会发展的需要条件下，经济、社会、环境协调发展时，区域或流域耗水量最小的状况^[5]。与此同时，水资源高效利用对水资源短缺地区更为关键，由于水资源短缺而造成的国民经济损失可以通过合理配置水资源和节水技术而得到大幅度的减少，这样不仅可以满足经济发展和人民生活的需求，还可以满足未来社会对水资源的需求^[6]。水资源高效利用关键在于做好水资源优化配置，一方面统筹考虑地表水、地下水等各类水源，另一方面对工业、农业、生活和环境的用水需求区别对待，突出核心，从而实现水资源的可持续利用，经济与社会的可持续发展。

北京作为中国的首都，也是水资源稀缺的地区之一，在国家南水北调工程实施的背景下，南水北调中线水进京之后如何高效利用成为北京市水资源管理至关重要的环节。鉴于此，本研究通过构建有无外调水两种情景下的水资源优化配置模型，以 2015 年的实例分析比较不同水源消耗情况和不同用户使用情况的变化，探究外调水进京后对当地水资源原有水功能的影响，进而得出外调水进京后北京市水资源高效利用的方案。

1. 北京市水资源概况

北京市处于我国华北地区，气候干旱少雨，水资源严重不足。北京人均水资源不足 300m³，而且降水大多发生在夏季，形成的多为地表径流，对地下水的恢复十分不利，并且在 21 世纪的前十年，北京市经历了接连数年的干旱，同时北京市各大水库的蓄水量随着降雨量的减少也是大幅度的下降，由于目前北京经济社会的高速发展、人口密度的不断增加，对水资源的需求也随之不断扩大^[7]。在这种环境

条件下,为了缓解北京等北方城市水资源短缺问题,国家启动了南水北调工程,从汉江的丹江口水库调水进京,使得北京市从地表水、地下水两类水源转变为地表水、地下水、外调水三类水源。从供水方面来看,近年来,北京市的水资源供需结构出现了很大改变,21世纪以前,水源主要是地下水和地表水,进入21世纪以后,随着节水技术的发展和人们节水意识的增强,再生水成为水资源供应的一部分,并且所占比例不断增加,地下水供水总量下降,比例不断减小,地表水供水量比例下降更为迅速,随着应急供水和南水北调外调水,北京市水资源供应结构还将持续发生变化。从用水方面来看,近些年来北京市生活、工业、环境、农业这四个用水部门中,环境用水每年的用水量增长比较快,生活用水量缓慢增加,呈现出下降趋势的主要是工业用水和农业用水。随着北京市进行产业结构调整、城市化进程的不断推进、农业节水技术的应用以及人们节水意识的增强,农业用水量也会随之不断减少。

2. 水资源优化配置模型的建立

为了对北京市水资源高效利用提出更为合理可行的配置方案,以南水北调中线水进入北京的第一个完整年2015年为典型年,建立水资源优化配置模型,采用2000~2014年的水资源数据,按照有外调水和无外调水两种情况分别对2015年的各用户的用水量进行预测计算,分析外调水进京之后对当地水资源功能的影响,然后与2015年北京市水资源的实际各用户用水情况进行对比,得出在有外调水进京的情况下北京市水资源高效利用的方案。

2.1 需水量预测

地区需水主要指“三生”需水即生产需水,生活需水以及生态需水,根据《北京市统计年鉴资料》公布的数据,将北京市供水量按用途划分为生活用水,工业用水,农业用水以及环境用水等四种,所以本文将生产需水分为工业需水和农业需水,生态需水表现为环境需水。

2.1.1 生活需水

生活需水采用的是日用水定额法进行预测分析,并将生活需水分为城镇居民生活需水和农村居民生活需水。城镇和农村居民生活用水定额的确定需要综合考虑经济社会发展状况、居民生活用水习惯和水价政策的改变等。

$$W_{\text{生活}i} = 365 \times K_i \times P_i / 1000 \quad (1)$$

式中: $W_{\text{生活}i}$ 为第 i 个用户的生活需水量, 亿 m^3 , i 为用户分类的序号, $i=1$ 为城镇居民生活用水, $i=2$ 为农村居民生活用水, K_i 为第 i 个用户的用水定额, $\text{L}/\text{人} \cdot \text{d}$, P_i 为第 i 用户的人口。

2015年北京市城镇居民人口1877.7万人,农村居民人口292.8万人,根据《城市给水工程规范》,北京市城镇单位人口用水指标为0.4~0.7万 $\text{m}^3/(\text{万人} \cdot \text{d})$,但因为北京市地处中国水资源稀缺的区域,并且节水工作进展的相对较快,城镇居民素质普遍较高,并且结合山东省济南市节水建设节水指标的预测、《北京市节约用水规划的研究》以及《天津市居民小区节水标准》,得出2015年北京市城镇居民用水指标为240 $\text{L}/\text{人} \cdot \text{d}$,农村居民生活用水指标为135 $\text{L}/\text{人} \cdot \text{d}$ 。按式(1)计算北京市2015年生活需水量为17.89亿 m^3 ,其中城镇居民需水量为16.45 m^3 ,农村居民需水量为1.44亿 m^3 。

2.1.2 工业需水

工业需水预测采用回归预测分析法,因为连续多年工业用水的变化范围是有一定规律的,采用北京市近15年的工业用水量数据,建立工业用水量与工业产值之间的回归关系模型,对工业需水量进行预测。

一般条件下,工业需水量和工业产值的关系为非线性关系,本文利用数学变换将其化为线性关系,利用线性回归的方法确定其回归模型。工业需水量与工业产值的非线性回归数学模型为:

$$Q_g = a \times Z_g^b + c \quad (2)$$

式中: Q_g 为预测工业需水量, 亿 m^3 ; Z 为预测工业产值, 亿元; a , b 为回归系数; c 为常数项。

根据北京市 2001~2014 年的工业用水量和工业产值，得到式 (2) 中的各项参数为 $a=-8.847$ ， $b=0.1685$ ， $c=42.67$ ，预测北京市 2015 年工业产值将会达到 4046 亿元，通过式 (2) 得到北京市 2015 年的工业需水量为 6.9 亿 m^3 。

2.1.3 农业需水

农业需水包括三个部分，分别是灌溉需水、鱼塘补水和牲畜需水。灌溉需可以利用灌溉定额乘以灌溉面积的方法进行计算，需水预测公式如下：

$$W_{\text{灌溉}} = w \times A \quad (3)$$

式中： $W_{\text{灌溉}}$ 为用户的年灌溉需水量，亿 m^3 ， w 为灌溉用水定额， m^3 /亩， A 为灌溉面积，万亩。21 世纪北京市开始加快建设节水型社会，在 2015 年有效灌溉系数将会达到 0.85，根据北京市用水办公室发布的《北京市主要行业用水定额》，来水频率为 50% 的水平年农业用水约为 3000 m^3 /公顷，北京市灌溉面积约为 140 千公顷，由此计算得到北京市 2015 年灌溉需水达到 4.2 亿 m^3 。与灌溉需水量相比，鱼塘补水需水量以及畜牧业需水量很小，本研究忽略不计。

2.1.4 环境需水

对环境需水量的预测采用灰色模型预测的方法，该方法通过判断系统内各个因素之间发展趋势的相异程度，并对原始数据进行处理，找出系统发展过程中的规律，生成有较强规律性的数据序列，然后利用相应的微分方程模型预测未来某一时刻的特征量。本研究采用传统的 GM (1, 1) 残差模型，利用北京市 2000~2014 年的生态环境用水量对 2015 年的环境需水量进行预测，得到 2015 年北京市环境需水量为 11 亿 m^3 。

2.2 供水量预测

本研究对 21 世纪以来十多年的数据，综合评价北京市水资源的供需状况，明确不同来源的水资源的供给情况，并根据其在不同水平年内的供应配比，研究外调水进京之后，北京市水资源在不同水平年的水量供应情况。依据近 15 年的各年北京市水资源供水总量绘制 P-III 型曲线，得到北京市多年平均水资源总量为 35.65 亿 m^3 ，变差系数 $C_v=0.04$ ，偏态系数 $C_s=1.8$ ，预测 2015 年各类水源供水总量 40.66 亿 m^3 ，其中地表水为 4.81 亿 m^3 ，地下水为 18.84 亿 m^3 ，再生水为 7.01 亿 m^3 ，外调水为 10 亿 m^3 。

2.3 水资源优化配置模型的构建及求解

2.3.1 模型的建立

水资源优化配置模型的决策变量设定时考虑两种情况，一种是有外调水情况，另一种是没有外调水情况。

在考虑外调水的条件下，将北京市水资源分为四类，分别为外调水资源、地表水资源、地下水资源和再生水资源，用水部门分为工业用水，生活用水，环境用水和农业用水。因为外调水资源水质较优，所以优先考虑供给生活用水，环境用水对水质要求较低，所以不考虑外调水对环境用水的供给，生活用水中所用的再生水量较小，不考虑生活用水的回用，其决策变量设定情况见表 1。

表 1 有外调水条件下决策变量

	工业用水量	生活用水量	环境用水量	农业用水量
地表水资源	x_1	x_5	x_9	x_{13}
地下水资源	x_2	x_6	x_{10}	x_{14}
再生水资源	x_3	x_7	x_{11}	x_{15}
外调水资源	x_4	x_8	x_{12}	x_{16}

在不考虑外调水的条件下，将北京市水资源分为三类，分别为地表水资源、地下水资源和再生水资源，用水部门分为四个，分别为工业用水，生活用水，环境用水和农业用水。生活用水中所用的回用水量较小，故不考虑生活用水的回用，由此确定的决策变量情况见表 2。

表 2 无外调水条件下决策变量

	工业用水量	生活用水量	环境用水量	农业用水量
地表水资源	x_1	x_4	x_7	x_{10}
地下水资源	x_2	x_5	x_8	x_{11}
再生水资源	x_3	x_6	x_9	x_{12}

目标函数：以四类用水部门的综合用水效益最大作为目标，结合考虑社会、经济的发展需求和环境保护的需要，确定不同用水部门的用水效益系数。在本文中采用多目标规划的方法，水资源在各用水部门的最优分配模型考虑工业、农业、生活和环境四个部门效益的最大化，目标函数如下所示：

$$\begin{aligned}
 \text{Max}F(x) &= \text{Max}[f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)] \\
 \text{Max}f_1(x) &= C_1 \times Q_1 \\
 \text{Max}f_2(x) &= C_2 \times Q_2 \\
 \text{Max}f_3(x) &= C_3 \times Q_3 \\
 \text{Max}f_4(x) &= C_4 \times Q_4
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中： x 为决策变量，非负约束； $f_1(x)$ 为工业用水效益； $f_2(x)$ 为生活用水效益； $f_3(x)$ 为环境用水效益； $f_4(x)$ 为农业用水效益目； C_1 为工业用水效益系数； C_2 为生活用水效益系数； C_3 为环境用水效益系数； C_4 为农业用水效益系数； i 为不同的供水水源（考虑外调水 $i=1,2,3,4$ ；不考虑外调水时 $i=1,2,3$ ）

工业用水效益系数 C_1 采用产值分摊的方法，计算公式如下：

$$C_1 = \beta \times (Q_g / W) / Q_g = \beta / W \tag{5}$$

式中： C_1 为工业用水效益系数； β 参照水利经济研究会的成果工业供水效益分摊系数确定，记为 11%； Q_1 工业用水量； W 为万元工业产值耗水量^[8]。本文采取多种工业行业的用水效益平均值以使优化配置结果更具有客观性，计算结果见表 3。

表 3 各工业行业单位用水效益系数

行业	冶金	电力	轻工	建工	化工	建材	陶瓷	纺织	食品	机械
β	11%									
$W / (\text{m}^3/\text{万元})$	11.54	49.57	50.23	21.43	30.33	31.82	23.71	49.12	39.95	16.51
$C_1 \times 10^{-3}$	9.53	2.22	2.19	5.13	3.63	3.46	4.64	2.24	2.75	6.66
$C_1 \times 10^{-3} / (\text{平均值})$	4.24									

水作为生产中的要素，本文将水的效益作为产量，再将生产函数理论应用到用水量和用水效益的关系分析^[9]。以工业用水效益为基准，其他三类用水部门用水效益与用水量的关系如图 1 所示。

$$\begin{aligned}
 C_2 &= C_1 \times \lambda_2 \\
 C_3 &= C_1 \times \lambda_3 \\
 C_4 &= C_1 \times \lambda_4
 \end{aligned} \tag{6}$$

式中： λ_2 为单位生活用水效益折算系数， λ_3 单位农业用水效益折算系数， λ_4 单位环境用水效益折算系数。

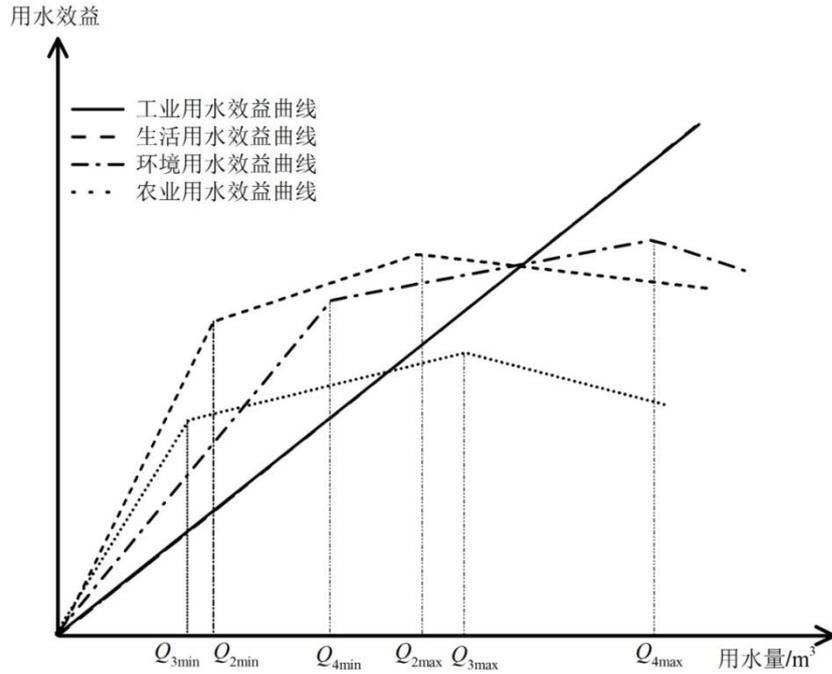


图 1 用水效益与用水量关系曲线

从图 1 可以看出，尽管决策者希望达到的理想状态是各个部门的用水效益都达到最大值，这也就要求水资源的供应量都达到一个 Q_{max} ，但因为水资源在北京市来说是稀缺资源，所以这种情况是很难实现的，不可能让每一个用水部门的用水都达到 Q_{max} ，也可以说是四个目标的实现之间具有冲突，另外，还有可能因为气候因素而导致出现的不可预见的情况，比如洪涝、干旱等。在这种情况下，我们需要协调各个用水部门之间的利益，在每一个目标的实现上寻找最好的一个结合点，最大限度使整体用水效益最优、最协调。当每个需水部门的可用水量在 Q_{min} 和 Q_{max} 之间时，由德尔菲法确定各自的用水效益折算系数得到考虑外调水情况下最终的目标函数为：

$$\begin{aligned}
 MaxF(X) &= Max[f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)] \\
 Maxf_1(x) &= C_g \times \sum_{i=1}^4 x_{i2} = 4.24 \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \\
 Maxf_2(x) &= \lambda_2 \times C_g \times \sum_{i=1}^4 x_{i2} = 18.426 \times 10^5 + 1.696 \times 10^5 \times (x_5 + x_6 + x_7 + x_8) \\
 Maxf_3(x) &= \lambda_3 \times C_g \times \sum_{i=1}^4 x_{i3} = 8.25 \times 10^5 + 1.272 \times 10^5 \times (x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12}) \\
 Maxf_4(x) &= \lambda_4 \times C_g \times \sum_{i=1}^4 x_{i4} = 5.145 \times 10^5 + 0.848 \times 10^5 \times (x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16})
 \end{aligned} \tag{7}$$

注：本研究中不考虑外调水的情况就是将上述目标函数中的四个用水部门改为三个用水部门。

约束条件：主要包括供水量约束和需水量约束。

(1) 不同供水水源的水量约束

一个地区的天然来水量、内部蓄水工程、外部调水工程、水资源的管理等决定着区域水资源的蓄水量。同时，区域的不同类型供水水源水质特征决定了不同类型水源所能提供的用水部门，并且在计算中，不同用水部门的用水保证程度不同，地表水的可供水量是地表水用水量的上限，地下水的取水量也不能超过地下水可开采量。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 x_{ij} \leq Q \\ \sum_{j=1}^4 x_{ij} \leq Q_i \end{cases} \tag{8}$$

式中： Q 为北京市总供水量， Q_i 为不同类型供水水源的可供水量。

(2) 用水部门用水量约束

将北京市用水部门分为工业用水、农业用水、生活用水和环境用水之后，各个用水部门的所需要的用水量是不同的，根据不同用水部门的用水定额及其用水保证程度确定不同部门的最大用水量和最小用水量。

$$Q_{\min,j} \leq \sum_{i=1}^4 x_{ij} \leq Q_{\max,j} \quad (9)$$

式中： $Q_{\min,j}$ 为不同用户的最小需水量， $Q_{\max,j}$ 为不同用户的最大需水量，根据北京市城市发展规划以及 21 世纪以来各部门用水数据，确定的不同用户用水量见表 4。

表 4 不同用户的需水量值 单位：亿 m³

不同用户需水量	用水预测	最大需水量	最小需水量
城市工业	6.9	8.63	6.21
城市生活	17.89	22.36	16.1
城市环境	11	13.75	8.25
城市农业	4.2	5.25	3.15

注：生态用水与农业用水存在很高的关联度，据相关学者的预测研究，其需水量的最大值与最小值可以取预测值的 20%—30% 的变化范围，本文取 25%；生活用水保证程度要求最高，所以最小需水量取预测值的 95%，工业用水保证程度要求相对较高，本研究对于工业需水量的最小值取预测值的 90%。

3.3.2 模型求解

在解决多目标问题是采用目标达到法，将多目标问题转化为非线性规划问题，并且通过对目标达到法的改进方法，使问题变为最大、最小化问题来获得更合适的目标函数。在 Matlab 工具箱中，使用 `fgoalattain` 函数可以实现这个目标，它是基于 Goal Attainment Method 算法，就是使目标与待优化的函数之差最小，而且能使这种算法更具有鲁棒性。Matlab 中调用 `fgoalattain` 函数如式 (10) 所示：

$$[x, fval, attainfactor, exitflag] = fgoalattain(fun, x_1, goal, weight, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (10)$$

式中： x_1 表示初值， fun 表示要优化的目标函数， $goal$ 表示函数， fun 要逼近的目标值，是一个向量，它的维数大小等于目标函数 fun 返回向量 F 的维数大小， $weight$ 表示给定的权重向量，用于控制目标逼近过程的步长，一般情况下与 $goal$ 相等。 A, b 为线性不等式约束， Aeq, beq 为线性等式约束。

2.4 结果分析及讨论

2.4.1 结果分析

(1) 有无外调水条件下的本文希望达到最优值时，生活、工业等四类用户的用水量都要达到 $Q_{\max,i}$ ，但在实际过程中，四类用户同时达到 $Q_{\max,i}$ 的情况是很难的，几乎不能实现，所以在有外调水的条件下，将目标 $goal$ 设为 36.59×10^5 万元、 56.35×10^5 万元、 18.74×10^5 万元、 7.82×10^5 万元， $weight$ 的值与 $goal$ 相同，按优先考虑生活用水，并且外调水全部投入使用，得到一组优化配置方案；同时，在没有外调水情况下，按优先考虑生活用水，得到该模型下的优化配置方案，其结果如图 2 所示。

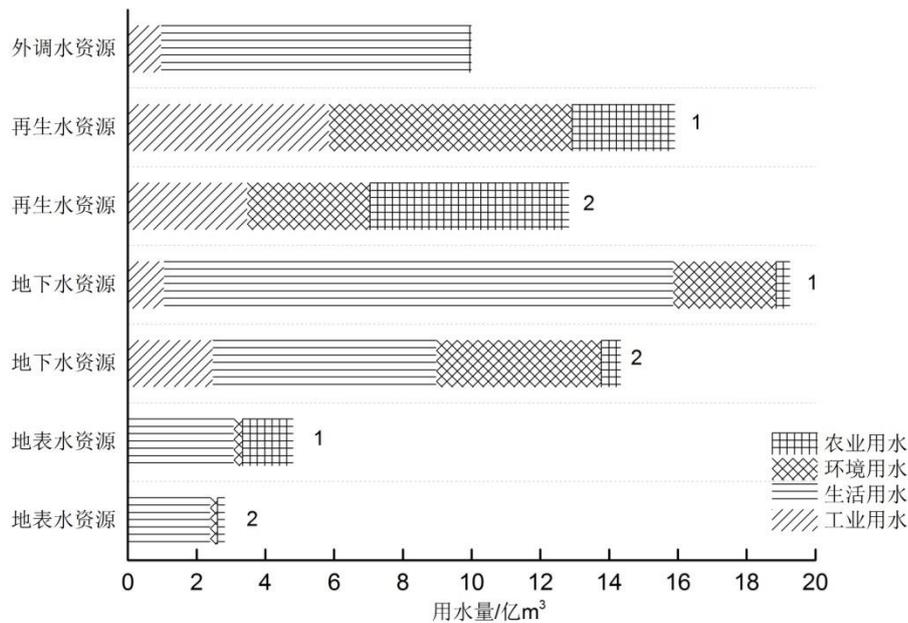


图 2 有、无外调水各类用户用水量情况

(标号 1 为没有外调水的情况，标号 2 为有外调水的情况)

从图 2 可以看出，随着外调水进入北京，原有水源（再生水、地下水、地表水）总的使用量均呈现下降的情况，从水量的减少情况来看，地表水减少 1.99 亿 m^3 ，地下水减少 5.5 亿 m^3 ，再生水减少 3.51 亿 m^3 ，地下水减小幅度最大，表明外调水进京后，地下水的用量减少最多，有效改变了北京对地下水的消耗。而从变化的相对情况来看，地表水减少 41.4%，地下水减少 23.9%，再生水减少 21.5%，地表水的变化情况最为明显。

根据配置方案计算得到有、无外调水情况下生活、工业等用户需水量占各类水源供水的比例见表 5。

表 5 有、无外调水情况下各类需水在各类供水水源占比 单位：%

水源类型	有外调水各用户用水情况				无外调水各用户用水情况			
	工业	生活	环境	农业	工业	生活	环境	农业
地表水	0	85	7	8	0	64	5	31
地下水	17	45	33	5	5	77	15	3
再生水	27	0	28	45	37	0	44	19
外调水	11	90	0	1				

从表 5 中可以看出南水北调中线水对北京市当地水资源功能的影响很大。如果外调水年来水量为 10 亿 m^3 ，并且在年内完全被使用，不同需水用户用水量在各类水源供水量的占比也发生很大变化，即各类水源的功能发生了显著地变化。引入外调水之后，地下水提供生活用水的比例从之前的 77% 下降到了 45%，使得地下水供给生活用水的量锐减，而提供环境用水的比例显著增加，从无外调水情况下的 15% 上升到了 33%，这表明外调水的引入使得一部分提供生活用水的地下水转移到了提供环境用水；对于地表水而言，农业用水占比大幅减少，有外调水时下降了 23%，与此同时，生活用水占比增多，从无外调水时的 64% 上升到了有外调水时的 85%，这表明外调水的引入使得地表水的功能更多地转向了提供生活用水；从再生水上看，优化方案中的再生水资源中的工业用水、环境用水和农业用水变化都相对较大，工业用水和环境用水占比因为外调水引入分别而下降了 10% 和 16%，农业用水占比则明显增加，上升了 26%，这表明外调水的引入增加了对农业推进节水技术和水资源循环利用的要求。

另外，根据配置方案计算得到有、无外调水情况下各水源供水量在生活、工业等用户需水量中的占比见表 6。

表 6 有、无外调水各类供水水源供水量在各类需水中的占比 单位：%

用户类型	有外调水				无外调水		
	地表水	地下水	再生水	外调水	地表水	地下水	再生水
工业用水	0	36	50	14	0	35	65
生活用水	13	36	0	51	17	83	0
环境用水	2	44	54	0	2	29	69
农业用水	25	13	61	1	30	9	60

从表 6 中可以看出，从工业用水上看，地下水占比并未改变，外调水的引入使得再生水占比下降了 15%；从生活用水上看，在无外调水的情况下地下水提供了 83%的生活用水，而外调水引入之后，这个比例骤降到了 36%；与此同时，环境用水中的地下水占比上升了 15%，这表明地下水对于生活用水供给减少的量部分被用于生态环境；从农业用水上看，各类水源占比则改变不大。综合来看，外调水的引入对再生水在各类需水中的占比影响最大，对地表水在各类需水中的占比影响最下。

(2) 因为 2015 年为外调水进京的第一个完整年份，所以将预测的有外调水情况和 2015 年实际情况进行对比，预测情况和实际情况的优化配置结果如图 3 所示。

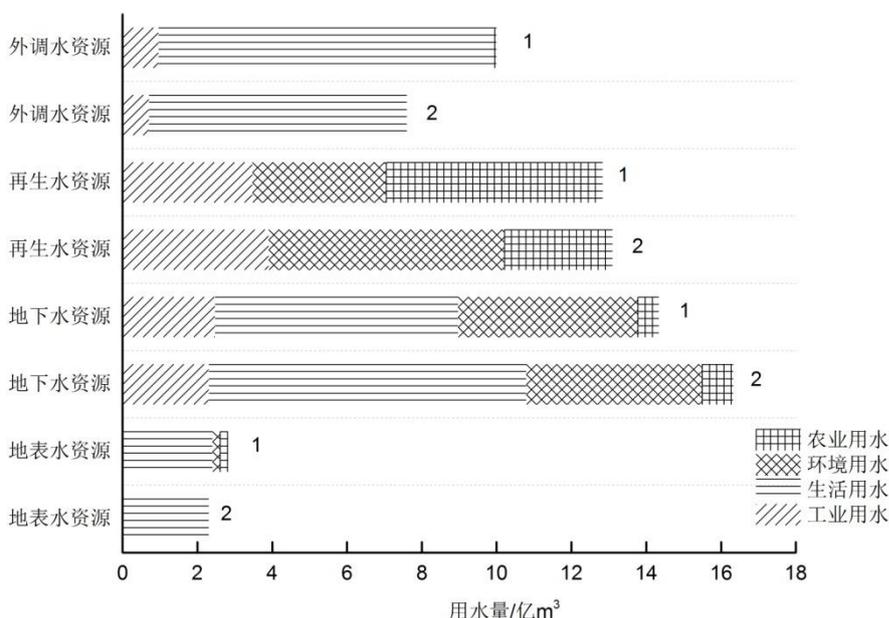


图 3 2015 实际情况与预测情况对比

(标号 1 为假设情况，标号 2 为 2015 年实际情况)

从图 3 可以看出，2015 年南水北调进京水为 7.6 亿 m³，并未达到规划的 10 亿 m³，这就造成了实际情况下地下水资源和再生水资源使用量比假设情况偏大，但从变化的相对情况来看，影响并不是很显著，地下水使用量仅仅上升了 12.1%，而再生水资源使用量仅仅提高了 2.0%，而地表水资源使用量在外调水未达到规划的情况下变小了，说明在外调水没有达到规划的水平时的缺水量由地下水补给。

根据配置方案计算得到有、无外调水情况下各水源供水量在生活、工业等用户需水量中的占比见表 7。

表 7 2015 实际情况与假设情况各类供水水源供水量在各类需水中的占比 单位：%

用户类型	实际情况				预测情况			
	地表水	地下水	再生水	外调水	地表水	地下水	再生水	外调水
工业用水	0	33	57	10	0	36	50	14
生活用水	13	48	0	39	13	36	0	51
环境用水	0	43	57	0	2	44	54	0
农业用水	1	30	68	1	25	13	61	1

从表 7 可以看出，工业用水和环境用水的预测情况和实际情况差别不大，说明外调水量未达到规划值时对各类水源在工业用水和环境用水中的占比影响不大；从生活用水上看，因为实际情况下外调水比

假设情况小，所以地下水的供应占比提高了 12%，以弥补外调水未达到规划值的缺口；从农业用水上看，实际情况下利用地下水比地表水高接近 30%，而假设情况则更多使用地表水，这对于保护北京市地下水资源比较有利，说明假设的优化配置方案更注重考虑地下水的利用和保护。

根据配置方案计算得到 2015 实际情况与预测情况下生活、工业等用户需水量占各类水源供水的比例见表 8。

表 8 2015 实际情况与预测情况各类用水户用水量在各类供水水源占比 单位：%

水源类型	实际用水情况				预测用水情况			
	工业	生活	环境	农业	工业	生活	环境	农业
地表水	0	100	0	0	0	85	7	8
地下水	14	52	29	5	17	45	33	4
再生水	30	0	48	22	27	0	28	45
外调水	8	91	0	1	10	90	0	1

从表 8 中可以看出，假设情况与 2015 年实际情况各类用水户用水量在各类供水水源占比差别不大，影响最大的是再生水的使用量，实际情况下中，环境用水在再生水中的所占比例较高，比假设条件下的占比增加了 20%，而农业用水的占比减少了 23%，这也说明了在外调水进京的量达到规划水平时，对农业水资源的循环利用要求更高；因为 2015 年南水北调进京水并未达到规划的 10 亿 m^3 ，在这种情况下，为了满足各类用水用户的需求，在实际配水过程中，地下水提供给生活用水的水量增加了 1.99 亿 m^3 ，在环境用水上的配比减少了 4%，在农业和工业上的配比基本不变；两种情况下生活用水在外调水中的占比都达到了 90%。总体上看，尽管外调水在 2015 年没有达到规划的 10 亿 m^3 ，但是从各类需水用户用水量在各类水源中的占比来看，实际情况与假设情况差别不大，除个别变量以外，其他变量占比的变化都在 10% 以下，这说明假设情况与实际情况基本一致，表明本研究的水资源优化配置模型较为合理、可靠。

2.4.2 结果讨论

通过对 2015 年实际情况和预测情况对比，可以看出为了在有外调水进京的条件下更高效地使用北京市水资源，并最大限度满足各类用户用水需求，应尽可能多的使用外调水资源满足生活用水的需求，余下的外调水可以提供给农业用水和工业用水，这样可以减轻地下水资源供给生活用水的压力，从而减少对地下的开采，涵养地下水并使地下水得到有效的回补，北京市地下漏斗面积减小，地下水位逐步回升；同时，原本提供生活用水的地下水有部分可以用来提供环境用水，有利于缓解北京市的环境污染问题。在外调水来水量达不到规划的情况时，需要在工业、农业和环境三方面改进节水技术，推广水资源的循环利用，从而使再生水资源的使用量得到提升以满足用户需求，尤其是农业用水，从以上两种情况的对比来看，在有外调水和外调水达到规划的水平时，都对再生水中的农业用水提出了较高的要求，大力推广节水技术，加强农业水资源的循环利用是高效利用水资源的重要一步；对于地表水而言，在有外调水的情况下，地表水应该减少供给农业用水和生活用水的比例，适当提升供给生活用水的比例，这样可以增加官厅水库和密云水库的蓄水量，使得官厅水库的主要功能会由“防洪、发电、供水”转变为“防洪、生态供水、水资源储备”，密云水库的主要增加了水资源储备的功能，这样能有效改善北京市防范水资源短缺风险的能力^[7]。

同时，因为不同用水部门可能会对水资源的分配有着不同的理解，但水资源管理部门应该尽量满足各部门协调发展的要求。对于北京市而言，在水资源短缺的情况下，相关单位应该相互协商，高效合理地利用外调水，充分保护当地水资源，防止过度开采的情况出现，进一步推进和改善节水技术，将节水的工程措施和非工程措施结合起来，使得水资源使用量相同的情况下，区域或流域能达到最高经济效益、最理想的生态环境和最能满足人类社会发展的需要；或者在经济、社会、环境协调发展的同时，区域或流域耗水量达到最小的状况。

3. 结论

在考虑是否有外调水的情况下，通过水资源优化配置模型的构建和求解，外调水进京后改变了原有当地水源的用途和功能，地下水的供水量减少，再生水中的农业用水占比提高，部分地表水供水量从生

活用水转向农业和环境用水；生态环境补水量增加，生活用水中外调水占比最大，充分保证供水水质，工业用水和农业用水中地下水占比显著下降。总之，对于北京而言，外调水进京后改变了当地原有水资源的消耗格局，减少地下水的消耗，减缓地下水漏斗面积的扩大，增加了城市生态环境补水，有效地增强了当地的生态环境效益，水资源的综合效益得到了全面提升，实现了水资源的高效利用。

参考文献

- [1] 裴源生. 水资源高效利用概念和研究方法探讨[A]. 中国水利学会.中国水利学会 2005 学术年会论文集——节水型社会建设的理论与实践[C].中国水利学会:,2005:5.
- [2] 李文燕,王洪强,杜海燕. 水资源的高效利用与节水技术[J]. 农业与技术,2015,(22):218-227.
- [3] Engler A, Jara-Rojas R, Bopp C. Efficient use of Water Resources in Vineyards: A Recursive joint Estimation for the Adoption of Irrigation Technology and Scheduling[J]. Water Resources Management, 2016, 30:1-15.
- [4] Blanke A, Rozelle S, Lohmar B, et al. Water saving technology and saving water in China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(2):139-150.
- [5] 彭洋. 合理配置和高效利用水资源是解决水资源供需矛盾的根本[A]. 重庆市水利学会.重庆市水利学会“合理配置和高效利用水资源，服务城乡发展”专题研讨会论文集汇编[C].重庆市水利学会:,2013:5.
- [6] 张洪嘉. 农业水资源高效利用的定义及其内涵[J]. 经济研究导刊,2012,(34):56-57.
- [7] 潘莉. 南水北调北京受水区供水调适与管理[D].中国矿业大学(北京),2016.
- [8] 张雪飞. 唐山市区水资源优化配置研究[D].北京工业大学,2006.
- [9] 崔永伟,杜聪慧. 生产函数理论与函数形式的选择研究[J]. 中国管理科学,2012,(S1):67-73.
- [10]李五勤,冯绍元,刘培斌. 南水北调通水后北京水资源开发利用和管理面临的形势和任务[J]. 北京水务, 2007,06:11-13.