

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.001

# 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究

方国华<sup>1</sup>, 赵文萃<sup>2</sup>, 李鑫<sup>1</sup>, 闻昕<sup>1</sup>, 周冰逸<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029)

**摘要:**针对南水北调东线工程江苏段受水区的水资源调度与配置问题,以受水区总缺水量最小和泵站总能耗最小为目标,建立南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型。将南水北调工程调水与本地水资源进行联合配置,并以经济效益、社会效益、环境效益最大为目标,构建南水北调东线工程江苏段水资源配置模型。采用基本方案和节水方案进行了模型模拟,结果表明,在降水保证率分别为50%、75%和95%3种情况下,受水区节水方案缺水率比基本方案分别下降了2.91%、3.61%和3.83%;受水区节水方案下各工程基本完成了受水区的供水任务,且优先利用了泵站单位能耗较小的运西线进行调水,说明优化调度配置方式在保障受水区用水的基础上,能够以更为经济节能的方式运行。

**关键词:**南水北调东线工程江苏段;水资源优化调度;水资源配置;需水预测;受水区

**中图分类号:**TV212 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0001-08

**Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project** // FANG Guohua<sup>1</sup>, ZHAO Wencui<sup>2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, WEN Xin<sup>1</sup>, ZHOU Bingyi<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Province Water Engineering Sci-tech Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Aiming at the water resource dispatching and allocation problem in the receiving area of the Jiangsu Section of the East Route Project of the South-to-North Water Diversion Project, with the goal of minimizing the total water shortage in the receiving area and the total energy consumption of the pumping station, a water resource optimization scheduling model of the Jiangsu Section of the East Route Project of the South-to-North Water Diversion Project was established. The transfer water from the South-to-North Water Transfer Project was jointly allocated with local water resources, and the water resources allocation model for the Jiangsu Section of the East Route Project of the South-to-North Water Diversion Project was constructed with the goal of maximizing economic, social, and environmental benefits. The model simulation was conducted using the basic scheme and water-saving scheme and the results show that under the three conditions of 50%, 75%, and 95% precipitation guaranteed rates, the water shortage rate of the water-saving scheme in the receiving area decreased by 2.91%, 3.61%, and 3.83% compared to the basic scheme, respectively. Under the water-saving scheme in receiving area, each project has basically completed the water supply task in the receiving area, and prioritized the use of the Yunxi Line, which has a lower unit energy consumption of the pumping station, for water transfer. This indicates that the optimized dispatching and allocation model can operate in a more economical and energy-saving way while ensuring water use in the receiving area.

**Key words:** Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project; water resources optimal dispatching; water resources allocation; water demand prediction; receiving area

南水北调东线工程是我国跨流域调水的重大工程之一,是有效缓解京津冀地区和山东半岛水资源短缺问题的重大举措<sup>[1]</sup>。江苏段作为调水工程的起始段,同时承担着保障省内用水和省外供水的任

务,其水资源现状及发展趋势对于能否保证持续调水十分关键<sup>[2]</sup>。目前,南水北调东线工程江苏段受水区存在本地水可供水量不足、水资源时空分布不均等问题,受水区水资源供给主要依赖于工程调水<sup>[3]</sup>。

**基金项目:**江苏省水利科技项目(2020005)

**作者简介:**方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电规划及水资源保护研究。E-mail:hhufgh@163.com

与此同时,国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高对水资源保障能力提出了更高的要求,水资源不足仍然是制约江苏省持续高质量发展的瓶颈<sup>[4]</sup>。

针对跨流域水资源优化调度和配置的问题,国内外学者进行了广泛的研究。Nouri<sup>[5]</sup>提出多目标及多约束条件的水资源配置模型,并采用遗传算法对模型进行求解,分析计算得到突尼斯河流域水资源配置方案;彭安帮<sup>[6]</sup>考虑到跨流域水库群联合优化调度纬度高、动态性及非线性的特点,将调水与配置相结合,建立联合优化调度模型,采用改进的微粒群算法对模型进行求解,结果表明改进的微粒群算法可以有效增加跨流域联合优化调度模型的计算速度和模型精度;黄显峰等<sup>[7]</sup>建立基于碳足迹的区域水资源优化配置模型,结果表明在江苏省丰县水资源配置中考虑碳足迹,可实现碳排放减排 5.8%;Naghdi 等<sup>[8]</sup>考虑将地表水和地下水联合分配,提出了系统模拟-优化-协调处理模型,研究表明优化配置方案下地下水位可提高 30%;董增川等<sup>[9]</sup>提出利用综合赋权法优选水库群多目标调度方案,应用于金沙江下游梯级水库调度求解;田进宽等<sup>[10]</sup>建立了沙颍河流域水资源配置模型,利用 MIKE BASIN 软件求解表明配置后的调水方案可缓解河南地区缺水情况;张平<sup>[11]</sup>基于复杂适应系统,采用改进的粒子群算法进行求解多目标南水北调工程受水区水资源优化配置模型;王文杰等<sup>[12]</sup>以缺水量最小、泵站抽水量最小为目标,建立了江苏省南水北调工程水量优化调度模型,并采用改进的遗传算法求解;于凤存等<sup>[13]</sup>考虑南水北调东线工程湖泊调蓄能力,建立了湖泊群联合优化调度模型,计算得到最优水量调配方案;方国华等<sup>[14]</sup>提出了改进的多目标量子遗传算法求解南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型,充分利用湖泊的调蓄能力,提高水资源优化调度模型的计算速度和模型精度。然而,在以往的南水北调东线工程相关研究中,对于水利工程调度和水资源配置两者的结合研究较少。

在南水北调东线工程江苏段受水区水资源配置中,往往将《南水北调东线工程规划》中给各省的供水计划值作为工程可供水量,没有考虑到来水的变化、工程能力的提升以及工程调度规则的优化对受水区工程可供水量的影响<sup>[15-18]</sup>。因此,研究南水北调东线工程江苏段受水区水资源优化调度与配置,对于创新水资源调配研究方法、完善研究体系、提高受水区水资源保障能力、促进社会经济可持续发展具有重要的理论意义和实际运用价值。

### 1 南水北调东线工程江苏段概况

江苏段作为南水北调东线工程的源头,是在已

有的江水北调工程基础上扩大规模、向北延伸建设而成,形成了江苏境内运河线、运西线双线输水格局。工程输水干线长达 404 km,将洪泽湖、骆马湖与微山湖串联,并且与苏北灌溉总渠、淮沭河等骨干河道相贯通,为苏中、苏北地区供水。根据受水区自然地理以及灌区划分情况,结合沿线各部门用水户位置,将研究区域分成江淮区间、洪骆区间、骆微区间等 3 个一级区间;并进一步细分为里运河受水区、灌溉总渠受水区、洪泽湖周边受水区、三河受水区、二河-淮阴受水区、盐河受水区、连云港受水区、中运河受水区、徐洪河受水区、骆马湖周边受水区、不牢河受水区、下级湖受水区等 12 个二级区间。考虑到南水北调东线工程江苏段新老泵站联合运行、多个湖泊贯通、河道纵横交错等特点,对系统进行了概化处理,结果如图 1 所示。

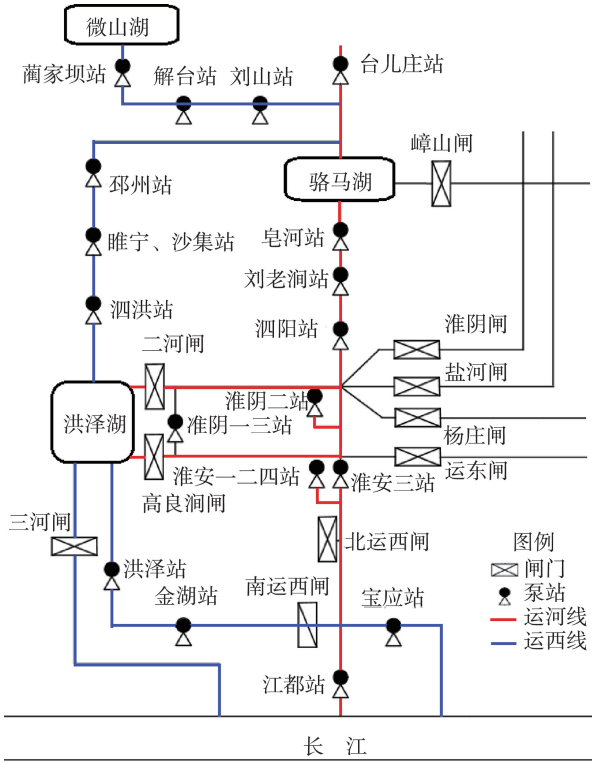


图 1 南水北调东线工程江苏段系统概化图

Fig.1 Schematic diagram of Jiangsu Section of East Route Project of South-to-North Water Diversion Project

### 2 南水北调东线工程江苏段水资源调配模型

水资源调度模型通常指针对多种工程联合运行的复杂情况,分析系统调度运行规则和历史调度规律,并根据不同工程单元上下游之间的水力联系建立的系统模拟模型,进而以特定需求作为目标函数进行模型求解。水资源配置模型则是根据特定的约束条件,对有限的、不同形式的水资源在各用水户之

间进行科学分配,以达到水资源合理利用。将水利工程调度与水资源配置相结合,是实现水资源宏观配置与微观调控统一的重要途径<sup>[11]</sup>。本文首先通过需水预测确定受水区需水量,基于需工程供水量构建水资源优化调度模型,得到调度规则下最优的工程调水方案;进一步将工程可调水量与受水区需水量、本地水可供水量作为输入条件求解水资源配置模型;最终在遵循公平性、高效性和可持续性原则<sup>[19]</sup>并满足各类约束的前提下,得到经济、社会和生态效益最优的受水区水资源调配方案。

## 2.1 水资源优化调度模型

以受水区总缺水量最小和泵站总能耗最小为目标,构建南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型<sup>[20]</sup>,作为下一步江苏段受水区水资源合理配置的前提。此外,基于优先利用本地水的原则,引入需工程供水量,先对南水北调东线工程江苏段受水区本地可供水进行常规的水资源配置,得到各二级分区的缺水水量即为南水北调东线工程调水任务的需工程供水量。

### 2.1.1 目标函数

研究南水北调东线工程江苏段水资源优化调度的目的是在满足工程绿色、安全运行的前提下,充分发挥工程调水能力,保障沿线受水区用水。优化调度的目标主要包括:①保证系统的安全运行,主要是水质安全、防汛安全、航运安全和生态安全;②完成调水任务,主要是满足省内和省外的用水需求;③尽量降低调水能耗,主要是在降低工程调水量基础上,增加对效率较高的泵站的利用,从而达到降低梯级泵站的运行成本以及节能减排的目标。其中,系统的安全运行目标可转化为系统中湖泊与河道的水位约束;调水任务目标分为省外供水任务和省内供水任务,将省外用水需求转化为模型中的出省调水量约束,而省内用水需求转化为受水区总缺水量最小的目标;降低系统调水能耗转化为泵站总能耗最小的目标。因此,南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型的决策变量为不同来水典型年下各泵站月抽水量,两个目标分别为受水区总缺水量最小和泵站总能耗最小。对受水区缺水水量最小和泵站总耗最小两个模型目标,采用线性加权法进行结果优选,根据序关系分析法确定受水区缺水水量最小和泵站总耗最小的权重系数,分别取0.87、0.13。

**a. 目标函数1。**受水区总缺水量最小,计算公式为

$$Q_{\text{BJ1}} = \min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (Q_{\text{Xi},t} - Q_{\text{Gi},t}) \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{BJ1}}$ 为受水区总缺水量; $t$ 为模型计算时段,本模型以月为计算时段, $T=12$ ; $i$ 为受水区分区编号; $I$

为分区总数, $I=12$ ; $Q_{\text{Xi},t}$ 为 $t$ 时段 $i$ 分区的需工程供水量; $Q_{\text{Gi},t}$ 为 $t$ 时段 $i$ 分区的工程供水量。

**b. 目标函数2。**泵站总能耗最小,计算公式为

$$Q_{\text{BJ2}} = \min \sum_{j=1}^J N_j \sum_{t=1}^T Q_{\text{Sj},t} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{BJ2}}$ 为泵站总能耗; $j$ 为泵站编号, $J=15$ ; $N_j$ 为 $j$ 泵站的能耗; $Q_{\text{Sj},t}$ 为 $t$ 时段 $j$ 泵站抽水量。

### 2.1.2 约束条件

由于在南水北调东线工程在规划期间已经对泵站工作能力与河道输水能力的配套问题加以考虑,因此在模型中不再重复考虑河道输水能力约束。

**a. 湖泊水量平衡约束:**

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + Q_{i,t} + D_{\text{li},t} + P_{\text{Ci},t} - W_{\text{li},t} - D_{\text{oi},t} - P_{\text{Ri},t} \quad (3)$$

式中: $V_{i,t+1}$ 为 $i$ 湖泊在 $t$ 时段末蓄水量; $V_{i,t}$ 为 $i$ 湖泊在 $t$ 时段初蓄水量; $Q_{i,t}$ 为 $t$ 时段入 $i$ 湖泊水量; $D_{\text{li},t}$ 为 $t$ 时段泵站抽入 $i$ 湖泊水量; $P_{\text{Ci},t}$ 为 $t$ 时段下泄入 $i$ 湖泊水量; $W_{\text{li},t}$ 为本区对 $i$ 湖泊在 $t$ 时段需水量; $D_{\text{oi},t}$ 为 $t$ 时段泵站抽出 $i$ 湖泊水量; $P_{\text{Ri},t}$ 为 $t$ 时段下泄出 $i$ 湖泊水量。

**b. 湖泊调蓄能力约束:**

$$V_{\text{mini},t} \leq V_{i,t} \leq V_{\text{maxi},t} \quad (4)$$

式中 $V_{\text{mini},t}$ 、 $V_{\text{maxi},t}$ 分别为 $i$ 湖泊在 $t$ 时段的最小、最大蓄水量。

**c. 控制闸站最大过流能力约束:**

$$0 \leq P_{\text{Ri},t} \leq P_{\text{Rmaxi},t} \quad (5)$$

式中 $P_{\text{Rmaxi},t}$ 为相应控制闸站的最大过流能力。

**d. 泵站工作能力约束:**

$$\begin{cases} 0 \leq D_{\text{oi},t} \leq D_{\text{omaxi},t} \\ 0 \leq D_{\text{li},t} \leq D_{\text{imaxi},t} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $D_{\text{omaxi},t}$ 、 $D_{\text{imaxi},t}$ 分别为 $t$ 时段出、入 $i$ 泵站的\*\*最大抽水能力。

**e. 北调控制水位约束。**为了避免北调抽水对于当地带来的影响过大,在南水北调实际运行中设置了洪泽湖、骆马湖及南四湖下级湖的北调控制水位。当湖泊水位低于北调控制水位,则停止抽该湖泊水北调。调蓄湖泊北调控制水位见表1。

**f. 决策变量非负约束。**在不同来水典型年下各泵站月抽水量非负。

## 2.2 水资源配置模型

### 2.2.1 目标函数

水资源配置以经济、社会、生态效益最大为目标。在构建南水北调东线工程江苏段受水区水资源配置模型时,根据水资源配置内涵,选择具有代表性且易于量化的指标。

**a. 经济目标。**反映供水给居民生活、工农业生

表 1 调蓄湖泊北调控制水位

Table 1 Controlling water level in north diversion of regulating and storing lakes

| 湖泊  | 控制水位/m      |               |              |             |
|-----|-------------|---------------|--------------|-------------|
|     | 7 月上旬至 8 月底 | 9 月上旬至 11 月上旬 | 11 月中旬至 3 月底 | 4 月上旬至 6 月底 |
| 洪泽湖 | 12.0        | 12.0 ~ 11.9   | 12.0 ~ 12.5  | 12.5 ~ 12.0 |
| 骆马湖 | 22.2 ~ 22.1 | 22.1 ~ 22.2   | 22.1 ~ 23.0  | 23.0 ~ 22.5 |
| 下级湖 | 31.8        | 31.5 ~ 31.9   | 31.9 ~ 32.8  | 32.3 ~ 31.8 |

产和生态环境带来的经济效益,本模型的经济目标为供水效益最大,即:

$$f_1 = \max \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{imn} b_{imn} \alpha_{imn} \beta_{imn} \quad (7)$$

式中:  $x_{imn}$  为  $i$  分区  $n$  水源为  $m$  用水户的供水量;  $b_{imn}$  为  $i$  分区  $n$  水源为  $m$  用水户供水的净效益系数;  $\alpha_{imn}$  为  $i$  分区  $n$  水源为  $m$  用水户供水的次序系数;  $\beta_{imn}$  为  $i$  分区  $n$  水源对  $m$  用水户的用水公平系数;  $M$  为用水户总数,  $M=4$ ;  $N$  为可供水源数量,本文中  $N=4$ ,包括本地地表水、地下水、再生水和南水北调外调水。

**b. 社会目标。**其设置是为了保障在水资源配置时可以统筹兼顾、协调发展,以达到受水区水资源在生活、生产、生态用水户之间均衡配置。本模型的社会目标为受水区总缺水量最小,即:

$$f_2 = \max \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M (D_{im} - \sum_{n=1}^N x_{imn}) \quad (8)$$

式中  $D_{im}$  为  $i$  二级分区范围内  $m$  用水户的需水量。

**c. 生态环境目标。**为了抑制因水资源配置给生态环境而带来对水环境的不利影响,设置生态环境目标。化学需氧量(COD)常用于判定水中有机物的污染量,本模型采用 COD 排放量最小来表示生态环境目标,即:

$$f_3 = \max \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M 0.01 p_{im} \rho_{im} \sum_{n=1}^N x_{imn} \quad (9)$$

式中:  $p_{im}$  为  $i$  二级分区  $m$  用水户的污水排放系数;  $\rho_{im}$  为  $i$  二级分区  $m$  用水户污水排放中 COD 的质量浓度。

### 2.2.2 约束条件

**a. 水源可供水量约束。**在各二级分区中各水源的供给水量,该水源给所有用水户的供水量之和应小于该分区该水源的可供水量,即:

$$\sum_{m=1}^M x_{imn} \leq W_{in} \quad (10)$$

式中  $W_{in}$  为  $i$  分区  $n$  水源的可供水量。

**b. 用水户需水量约束。**为保证受水区经济社会的稳定发展,分配给各受水区各用水户的水量应小于实际需水量,且大于其最小需水量,即:

$$D_{im, \min} \leq \sum_{n=1}^N x_{imn} \leq D_{im, \max} \quad (11)$$

式中:  $D_{im, \max}$  为  $i$  分区  $m$  用水户的实际需水量;  $D_{im, \min}$  为  $i$  分区  $m$  用水户的最小需水量。

**c. 受水区纳污能力约束。**为保护受水区规划年水生态环境,实现人与自然和谐发展,严格控制受水区污染物排放量,受水区污染物总排放量不应超过总纳污能力,即:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M 0.01 p_{im} \rho_{im} \sum_{n=1}^N x_{imn} \leq P_0 \quad (12)$$

式中  $P_0$  为受水区的总纳污能力。

**d. 决策变量的非负约束。**不同来水典型年下各水源向不同用水户的供水量非负。

### 2.2.3 模型参数确定

在对南水北调东线工程江苏段受水区进行水资源配置时,综合考虑配置的公平性和供水目标来确定水源供水次序系数和用水户用水公平系数。

供水次序系数  $\alpha_{mn}$  表示  $n$  水源给  $m$  用水户供水时,该水源相对于其他水源的先后次序,  $\alpha_{mn}$  越小表示越优先利用该水源,计算公式为

$$\alpha_{mn} = (1 + q_{mn, \max} - q_{mn}) / \sum_{n=1}^N (1 + q_{mn, \max} - q_{mn}) \quad (13)$$

式中:  $q_{mn}$  为水源供水次序序号;  $q_{mn, \max}$  为供水次序序号最大值。

用水公平系数  $\beta_{mn}$  表示  $n$  水源给  $m$  用水户供水的优先次序,当某用水户相对于该水源的用水公平系数越小,表明优先将该水源供给该用水户,  $\beta_{mn}$  的计算公式为

$$\beta_{mn} = (1 + k_{mn, \max} - k_{mn}) / \sum_{m=1}^M (1 + k_{mn, \max} - k_{mn}) \quad (14)$$

式中:  $k_{mn}$  为用水户用水次序序号;  $k_{mn, \max}$  为用水次序序号最大值。

## 3 结果与分析

### 3.1 需水预测

习近平总书记多次强调,为确保南水北调后续工程的高质量发展,要坚持和落实节水优先方针,提高水资源的节约利用水平<sup>[21]</sup>。因此,本文考虑两种需水方案:①按照水资源利用现状水平进行需水预测,即基本方案;②考虑实施优化产业结构、提高灌溉水利用系数等节水措施,充分挖掘规划年受水区节水潜力,通过分析规划年预期可达到的节水器具普及率、农业灌溉水利用系数及规划年万元工业增加值用水量等,分析强化节水情况下规划年需水量,



即节水方案。

需水预测方法包括基于统计规律的方法和基于系统分析的方法等<sup>[22]</sup>,通过分析比较各类预测方法的优劣,本文选取数据获取容易且计算过程简单的定额法为主要预测方法,同时运用趋势法等计算社会经济发展指标。以 2020 年为基准年,选取 2030 年为规划年进行需水预测。需水预测包括生活、工业、农业和生态共 4 个用水户。考虑到农业用水受降雨影响较为明显,因此,对降水保证率  $P$  分别为 50%、75% 和 95% 3 种情况下的农业需水量分别进行预测。数据来源于《江苏省统计年鉴》《江苏省水资源公报》《淮河流域水资源公报》《江苏省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》等。规划年基本方案下南水北调东线工程江苏段受水区各二级分区需水预测结果见表 2。

3.2 受水区可供水量

可供水量包括受水区范围内的本地地表水、地下水、外调水和再生水等各类水源,经过各分区地表水源工程、地下水源工程等供水工程设施,可以被人类利用的最大水资源量<sup>[23]</sup>。本文基于 50%、75%、95% 3 种降水保证率对规划年可供水量进行分析计算。其中,本地地表水、地下水和再生水通过计算南水北调东线工程江苏段受水区内的可供水量得到,而外调水则通过南水北调水资源优化调度模型确定。

根据江苏段受水区水资源开发利用情况、供水工程的输水能力以及各分区不同时间段的调度规则,在基准年供水工程规模的基础上考虑到规划年可开发的供水能力,包括下阶段改进灌溉排水体系、完善调水规则等,同时考虑逐步控制并降低对地下水的利用等综合确定。结果表明,规划年在降水保证率分别为 50%、75% 和 95% 时本地可供水量分别为

62.59 亿、41.97 亿、27.05 亿  $m^3$ 。其中,本地地表水可供水量最大,分别占总本地供水量的 83.37%、75.20% 和 61.52%。

3.3 水资源优化调度模型求解

基于优先利用本地水的原则,本文对南水北调东线工程江苏段受水区本地供水进行常规的水资源配置,得到各二级分区的缺水量即为南水北调东线工程调水任务。结果表明,基本方案下南水北调东线工程江苏段受水区在降水保证率为 50%、75%、95% 时的需工程供水量分别为 131.24 亿、159.41 亿、195.27 亿  $m^3$ ,节水方案下 3 种降水保证率需工程供水量分别为 112.08 亿、141.14 亿、178.04 亿  $m^3$ 。

南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型计算以月为单位,当年 10 月至次年 9 月为 1 个调水年。通过比较不同优化算法的优缺点,结合南水北调东线工程江苏段优化调度模型的实际特点,选择采用 NSGA-II 算法对模型进行求解,并采用基于组合权重的多属性决策方法对非劣方案集进行评价,得到南水北调东线工程江苏段各泵站月调水量。根据规划年基本方案和节水方案下南水北调东线工程江苏段的调水任务,设置种群个数为 200,迭代次数为 500,对水资源优化调度模型进行求解,得到两种方案在 50%、75% 和 95% 3 种降水保证率下的各泵站年调水量,结果见表 3。

3.4 水资源配置模型求解

基于前文得到的南水北调东线工程江苏段受水区各用水户的需水量、本地水源可供水量,以及通过水资源优化调度模型得到的南水北调东线工程给受水区的供水量,设置粒子群优化算法的粒子个数为 1000,迭代次数为 1000,对南水北调东线工程江苏段受水区水资源配置模型进行求解,得到基本方案和节水方案各降水保证率下各水源给各用水户的配

表 2 规划年基本方案下受水区需水预测结果

Table 2 Prediction results of receiving areas under basic scheme of planning year

| 受水区      | 生活          | 工业          | 农业需水量/亿 $m^3$ |          |          | 生态          | 总需水量/亿 $m^3$ |          |          |
|----------|-------------|-------------|---------------|----------|----------|-------------|--------------|----------|----------|
|          | 需水量/亿 $m^3$ | 需水量/亿 $m^3$ | $P=50\%$      | $P=75\%$ | $P=95\%$ | 需水量/亿 $m^3$ | $P=50\%$     | $P=75\%$ | $P=95\%$ |
| 里运河受水区   | 2.10        | 1.06        | 11.82         | 12.61    | 14.88    | 0.37        | 15.35        | 16.14    | 18.40    |
| 灌溉总渠受水区  | 1.78        | 1.45        | 16.39         | 17.53    | 20.74    | 0.31        | 19.94        | 21.07    | 24.29    |
| 洪泽湖周边受水区 | 1.29        | 0.92        | 10.84         | 11.58    | 13.69    | 0.22        | 13.28        | 14.02    | 16.13    |
| 三河受水区    | 0.93        | 0.76        | 6.91          | 7.37     | 8.70     | 0.16        | 8.76         | 9.23     | 10.55    |
| 二河淮阴受水区  | 1.13        | 1.60        | 7.59          | 8.12     | 9.48     | 0.19        | 10.51        | 11.04    | 12.41    |
| 盐河受水区    | 1.41        | 1.78        | 9.22          | 9.88     | 11.57    | 0.24        | 12.65        | 13.31    | 15.00    |
| 连云港受水区   | 3.40        | 2.09        | 22.61         | 24.39    | 28.72    | 0.57        | 28.67        | 30.45    | 34.78    |
| 中运河受水区   | 1.60        | 0.66        | 6.73          | 7.60     | 9.32     | 0.27        | 9.26         | 10.13    | 11.85    |
| 徐洪河受水区   | 1.42        | 0.88        | 5.10          | 5.54     | 6.57     | 0.24        | 7.64         | 8.08     | 9.11     |
| 骆马湖周边受水区 | 2.98        | 1.01        | 10.97         | 11.80    | 13.99    | 0.51        | 15.48        | 16.30    | 18.49    |
| 不牢河受水区   | 2.44        | 1.67        | 11.24         | 12.08    | 14.33    | 0.42        | 15.77        | 16.62    | 18.87    |
| 下级湖受水区   | 3.56        | 2.41        | 13.60         | 14.64    | 17.38    | 0.62        | 20.18        | 21.22    | 23.97    |
| 合计       | 24.03       | 16.30       | 133.03        | 143.14   | 169.38   | 4.13        | 177.49       | 187.60   | 213.84   |

表3 规划年两种方案下各泵站调水量

Table 3 Transfer water quantity of pump stations under two schemes in planning year

| 泵站   | 基本方案调水量/亿 m <sup>3</sup> |         |         | 节水方案调水量/亿 m <sup>3</sup> |         |         |
|------|--------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
|      | P = 50%                  | P = 75% | P = 95% | P = 50%                  | P = 75% | P = 95% |
| 宝应站  | 14.60                    | 18.70   | 25.82   | 15.36                    | 22.97   | 29.80   |
| 江都站  | 22.60                    | 29.20   | 40.05   | 18.91                    | 24.90   | 36.94   |
| 金湖站  | 18.74                    | 24.07   | 34.92   | 18.74                    | 26.63   | 36.47   |
| 淮安站  | 16.29                    | 19.98   | 28.15   | 17.09                    | 25.78   | 33.13   |
| 洪泽站  | 22.72                    | 29.98   | 40.88   | 18.00                    | 22.58   | 35.24   |
| 淮阴站  | 14.87                    | 18.40   | 26.95   | 13.78                    | 19.07   | 26.86   |
| 泗洪站  | 19.38                    | 26.06   | 36.36   | 14.16                    | 16.07   | 27.86   |
| 泗阳站  | 15.77                    | 20.37   | 28.32   | 13.87                    | 18.69   | 27.06   |
| 睢宁站  | 18.36                    | 24.39   | 33.78   | 16.83                    | 22.93   | 32.82   |
| 刘老涧站 | 16.01                    | 20.24   | 28.42   | 11.51                    | 13.52   | 22.61   |
| 邳州站  | 15.27                    | 20.06   | 28.10   | 14.18                    | 19.47   | 27.65   |
| 皂河站  | 13.38                    | 16.93   | 23.70   | 13.42                    | 19.60   | 26.07   |
| 刘山站  | 19.29                    | 25.40   | 35.20   | 14.84                    | 18.02   | 29.11   |
| 解台站  | 15.42                    | 19.49   | 27.50   | 13.07                    | 17.28   | 25.52   |
| 蔺家坝站 | 17.17                    | 22.20   | 30.18   | 14.65                    | 19.64   | 28.59   |

水量。结果表明,在降水保证率为 50%、75% 和 95% 时基本方案受水区总供水量分别为 172.32 亿、178.94 亿、199.61 亿 m<sup>3</sup>,节水方案受水区总供水量分别为 158.57 亿、167.63 亿、191.01 亿 m<sup>3</sup>。不同降水保证率下基本方案和节水方案最优解对应的目标函数值见表 4。

在不同降水保证率不同需水方案下,南水北调东线工程江苏段受水区规划年经济、社会、生态效益均存在差异,应根据受水区发展情况及来水条件等选择合适的水资源配置方案。对比不同的降水保证率下的目标值,随着降水保证率的提高,受水区的总供水量增大,由此产生的经济效益随之增加,且 COD 排放量也相应增加。对比基本方案和节水方案下的目标函数值,由于在节水方案下受水区的需水量整体降低,因此在 3 种降水保证率下的供水量均低于基本方案,产生的经济效益低于基本方案,受水区的缺水量减少,COD 排放量也有所降低。

### 3.5 综合分析

**a. 调水路线运用情况。**南水北调东线工程江苏段为运河线与运西线双线输水格局,其中骆马湖至南四湖-下级湖区间在江苏境内仅有不牢河一条调水线。因此,本文仅对长江至骆马湖段调水路线

运用情况进行分析,对骆马湖到南四湖-下级湖区间的调水路线运用情况不再分析。以基本方案为例,在降水保证率为 50%、75% 和 95% 时运河线抽水总量分别为 98.92 亿、125.12 亿、175.60 亿 m<sup>3</sup>,运西线抽水总量分别为 109.07 亿、143.26 亿、199.87 亿 m<sup>3</sup>。3 种降水保证率下运河线抽水总量均小于运西线抽水总量,这是由于运西线的泵站为改造或新建泵站,其泵站运行效率较高、单位能耗较低,因此水资源优化调度模型在对泵站总能耗最小目标进行寻优时,会优先利用泵站单位能耗较小的运西线进行调水。

**b. 各分区缺水情况。**基本方案在降水保证率为 50%、75% 和 95% 时的缺水量分别为 5.17 亿、8.66 亿、14.23 亿 m<sup>3</sup>,相应缺水率分别为 2.91%、4.62% 和 6.67%。节水方案 3 种降水保证率下的缺水量分别为 0.00 亿、1.70 亿、5.59 亿 m<sup>3</sup>,相应缺水率分别为 0.00%、1.01%、2.84%。规划年两种方案不同降水保证率下各分区的缺水率见表 5。从各分区缺水情况来看,水资源配置后各分区的缺水率整体较为均衡,基本满足了水资源配置中“均衡缺水压力”的原则。此外,节水方案下各分区缺水率均低于基本方案,说明通过提高节水水平,南水北调东线工程江苏段受水区缺水情况得到了有效的缓解。

表4 不同降水保证率下两种方案的目标函数值

Table 4 Objective function values of two schemes under different precipitation guarantee rates

| 方案   | 保证率/% | 总供水量/亿 m <sup>3</sup> | 经济效益/亿元 | 总缺水量/亿 m <sup>3</sup> | COD 排放量/t |
|------|-------|-----------------------|---------|-----------------------|-----------|
| 基本方案 | 50    | 172.32                | 882.841 | 5.17                  | 61469.6   |
|      | 75    | 178.94                | 886.702 | 8.66                  | 62980.1   |
|      | 95    | 199.61                | 889.914 | 14.23                 | 67555.1   |
| 节水方案 | 50    | 158.57                | 795.588 | 0.00                  | 57217.3   |
|      | 75    | 167.63                | 802.361 | 1.70                  | 59277.5   |
|      | 95    | 191.01                | 818.919 | 5.59                  | 64618.0   |

表5 规划年两种方案下受水区缺水量

Table 5 Water shortage in receiving areas under different precipitation guarantee rates of two schemes in planning year

| 受水区      | 基本方案缺水量/万 m <sup>3</sup> |          |           | 节水方案缺水量/万 m <sup>3</sup> |          |          |
|----------|--------------------------|----------|-----------|--------------------------|----------|----------|
|          | P=50%                    | P=75%    | P=95%     | P=50%                    | P=75%    | P=95%    |
| 里运河受水区   | 3 634.5                  | 6 251.4  | 11 098.0  | 0.0                      | 1 033.6  | 3 734.7  |
| 灌溉总渠受水区  | 5 187.0                  | 9 035.1  | 15 484.9  | 0.0                      | 1 428.0  | 5 387.9  |
| 洪泽湖周边受水区 | 3 475.5                  | 6 130.1  | 10 254.7  | 0.0                      | 904.6    | 3 568.0  |
| 三河受水区    | 2 403.4                  | 4 139.8  | 6 860.8   | 0.0                      | 718.0    | 2 506.3  |
| 二河淮阴受水区  | 2 775.4                  | 4 741.1  | 8 096.7   | 0.0                      | 986.4    | 3 022.6  |
| 盐河受水区    | 3 588.3                  | 6 167.4  | 10 096.2  | 0.0                      | 1 200.4  | 3 974.8  |
| 连云港受水区   | 8 350.6                  | 14 221.5 | 23 106.4  | 0.0                      | 2 679.6  | 8 833.0  |
| 中运河受水区   | 2 537.5                  | 4 531.6  | 7 634.1   | 0.0                      | 911.6    | 2 954.0  |
| 徐洪河受水区   | 1 747.5                  | 3 495.3  | 5 265.6   | 0.0                      | 552.1    | 1 740.9  |
| 骆马湖周边受水区 | 4 706.4                  | 7 951.1  | 12 310.8  | 0.0                      | 1 742.4  | 5 176.4  |
| 不牢河受水区   | 5 781.6                  | 9 067.1  | 14 078.1  | 0.0                      | 1 906.8  | 6 487.4  |
| 下级湖受水区   | 7 542.4                  | 10 844.5 | 18 043.4  | 0.0                      | 2 904.1  | 8 531.3  |
| 合计       | 51 730.3                 | 86 576.1 | 142 329.6 | 0.0                      | 16 967.7 | 55 917.1 |

c. 各用水户缺水情况。表6为两种方案不同降水保证率下各用水户的缺水量。可见,生态用水户缺水量最小,生活用水户缺水量次之,工业用水户缺水量较大,农业用水户缺水量最大。以基本方案中 $P=75\%$ 的情况为例,生活、工业、农业和生态用水户缺水量分别352.2万、3 329.7万、82 787.4万、106.8万m<sup>3</sup>。结合各用水户的需水量分别计算得到生活、工业、工业和生态用水户的缺水率,生活用水户和生态用水户缺水率较小,分别为0.15%和0.26%,工业用水户缺水率相对较大,为2.04%,农业用水户缺水率最大,为5.78%。分析其原因,这是由于模型中用水户用水公平系数的设置不同,在进行水资源配置发生缺水时会优先保证生活和生态用水户。

表6 两种方案不同降水保证率下各用水户缺水量

Table 6 Water shortage of each water user under different precipitation guarantee rates of two schemes

| 方案   | 保证率/% | 缺水量/万 m <sup>3</sup> |          |           |         |
|------|-------|----------------------|----------|-----------|---------|
|      |       | 生活用水户                | 工业用水户    | 农业用水户     | 生态用水户   |
| 基本方案 | 50    | 219.6                | 1 827.1  | 49 625.4  | 58.2    |
|      | 75    | 352.2                | 3 329.7  | 82 787.4  | 106.8   |
|      | 95    | 2 807.9              | 11 385.6 | 127 032.2 | 1 103.9 |
| 节水方案 | 50    | 0.0                  | 0.0      | 0.0       | 0.0     |
|      | 75    | 0.0                  | 943.7    | 16 023.9  | 0.0     |
|      | 95    | 0.0                  | 4 420.7  | 51 496.5  | 0.0     |

## 4 结 语

针对南水北调东线工程江苏段受水区存在本地水可供水量不足、水资源时空分布不均等问题,研究南水北调东线工程江苏段受水区水资源调配,将工程调水量作为配置的一种水源考虑,实现水源的动态变化捕捉,提出合理的水源配置方案,从而提高受水区水资源保障能力、促进社会经济可持续发展。研究结果表明,在水资源调配方案

下,各工程基本完成了受水区的需供水任务,且优先利用了泵站单位能耗较小的运西线进行调水,说明优化调度方式在保障受水区用水的基础上以更为经济节能的方式运行。在降水保证率为50%、75%和95%3种情况下,受水区节水方案缺水率比基本方案分别下降了2.91%、3.61%和3.83%,说明通过对规划年节水潜力进行挖掘,受水区缺水情况能够得到有效缓解。

## 参考文献:

- [1] 戴治波. 南水北调东线水资源调度多 Agent 模型与协作分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 李松柏, 孙涛. 新时代治水思路下江苏南水北调工程高质量发展战略研究[J]. 水利经济, 2021, 39(4): 19-23. (LI Songbai, SUN Tao. Study on high quality development strategy of Jiangsu South-to-North Water Diversion Project under the new era water control idea [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(4): 19-23. (in Chinese))
- [3] 李治军, 汪超, 陈海枫, 等. 江苏省水资源开发利用程度评价[J]. 水利规划与设计, 2022(8): 44-48. (LI Zhijun, WANG Chao, CHEN Haifeng, et al. Evaluation of water resources development and utilization in Jiangsu Province[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2022(8): 44-48. (in Chinese))
- [4] 江苏省水利厅. 江苏省国家节水行动实施方案[EB/OL]. (2019-08-14). [2021-12-30]. [http://qgjsb.mwr.gov.cn/zd gz/gjjsxd/201908/t20190814\\_1353263.html](http://qgjsb.mwr.gov.cn/zd gz/gjjsxd/201908/t20190814_1353263.html).
- [5] NOUIRI I. Multi-objective tool to optimize the water resources management using genetic algorithm and the Pareto optimality concept [J]. Water Resources Management, 2014, 28(10): 2885-2901.
- [6] 彭安帮. 跨流域水库群引水与供水联合优化调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

- [7] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 47-51. (in Chinese))
- [8] NAGHDI S, BOZORG H O, KHORSANDI M, et al. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources [J]. Science of the Total Environment, 2021, 776(12): 146026.
- [9] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [10] 田进宽,郭佳航,左其亭,等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 62-67. (TIAN Jinkuan, GUO Jiahang, ZUO Qiting, et al. Thoughts and calculation model for water resources allocation in Shaying River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 62-67. (in Chinese))
- [11] 张平. 南水北调工程受水区资源优化配置研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [12] 王文杰,吴学文,方国华,等. 南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 422-426. (WANG Wenjie, WU Xuewen, FANG Guohua, et al. Optimal water operation in Jiangsu section of the South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015, 13(3): 422-426. (in Chinese))
- [13] 于凤存,方国华,王文杰,等. 基于多目标遗传算法的南水北调东线工程湖泊群优化调度研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 78-85. (YU Fengcun, FANG Guohua, WANG Wenjie, et al. Optimized dispatching of the lake group system along the South-to-North Water Diversion Route based on the multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 78-85. (in Chinese))
- [14] 方国华,郭玉雪,闻昕,等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 34-41. (FANG Guohua, GUO Yuxue, WEN Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))
- [15] 王宗志,叶爱玲,刘克琳,等. 流域水资源供需双侧调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 265-276. (WANG Zongzhi, YE Ailing, LIU Kelin, et al. Modeling of bilateral joint regulation of basin-wide water resources supply and demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(3): 265-276. (in Chinese))
- [16] 侍翰生. 南水北调东线工程江苏境内工程水资源优化配置方法研究[D]. 扬州:扬州大学, 2013.
- [17] 宋丹丹,杨树滩,常本春,等. 江苏省南水北调受水区水资源配置[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 417-421. (SONG Dandan, YANG Shutan, CHANG Benchun, et al. Research on water resources allocation of Jiangsu intake district of South-to-North Water Transfer Project, South-to North Water Transfers and Water Science and Technology [J]. 2015, 13(3): 417-421. (in Chinese))
- [18] 闻昕,王志,方国华,等. 基于改进多目标粒子群算法的南水北调东线工程江苏段工程联合优化调度研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 110-116. (WEN Xin, WANG Zhi, FANG Guohua, et al. Study on optimal operation of Jiangsu section of eastern route of South-to-North Water Diversion Project based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(3): 110-116. (in Chinese))
- [19] 方国华,王雪,方应学,等. 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 58-64. (FANG Guohua, WANG Xue, FANG Yingxue, et al. Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [20] TSAI W P, CHANG F J, CHANG L C, et al. AI techniques for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 634-644.
- [21] 李国英. 推进南水北调后续工程高质量发展[J]. 水资源开发与管理, 2021(8): 1-3. (LI Guoying. Promote high-quality development of follow-up projects to the South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Development and Management, 2021(8): 1-3. (in Chinese))
- [22] 徐彦君. 基于神经网络需水量预测方法的综合评价与分析[D]. 沈阳:东北大学, 2006.
- [23] 王文君,方国华,李媛,等. 基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 91-96. (WANG Wenjun, FANG Guohua, LI Yuan, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water area on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 91-96. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-19 编辑:王芳)