

# 中运河(骆马湖—成子湖段) 输水潜力研究

李小红<sup>1</sup>, 蒋肇冰<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1</sup>, 丁国莹<sup>1</sup>, 刘兴华<sup>2</sup>

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 南京 210029;

2. 浙江国贸集团东方机电工程股份有限公司, 浙江 杭州 310016)

**摘要:** 中运河为京杭大运河的重要组成部分, 同时亦为南水北调东线一期工程输水骨干河道, 具有防洪、排涝、航运、供水等综合利用功能。南水北调东线一期江苏境内工程是在现有江水北调工程基础上扩大规模、向北延伸, 为推进南水北调东线后续工程建设, 充分挖掘一期工程河道输水潜力, 需进一步研究该段中运河现状输水能力, 在综合考虑各关联因素条件下合理确定河道现状的输水规模, 为南水北调东线后续工程建设提供技术支持。

**关键词:** 南水北调; 输水能力; 综合利用; 耦合模型

中图分类号: TV553 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)10-0020-0004

## Study on the water conveyance potential of the middle canal (Section of Luoma Lake to Chengzi Lake)

LI Xiaohong<sup>1</sup>, JIANG Zhaobing<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, DINA Guoying<sup>1</sup>, LIU Xinghua<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Nanjing 210029, China;

2. Zhejiang Guomao Group Dongfang Electromechanical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310016, China)

**Abstract:** The middle canal is an important component of the Beijing Hangzhou Grand Canal and also serves as the main water channel for the first phase of the eastern route of south-to-north water diversion project. It has comprehensive functions such as flood control, drainage, navigation, and water supply. The first phase of the eastern route of south-to-north water diversion project in Jiangsu Province is an expansion and northward extension of the existing the project of diverting water from the south to the north of the Yangtze River. In order to promote the subsequent construction of the eastern route of south-to-north water diversion project and fully tap into the water transport potential of the first phase of the project, it is necessary to further study the current water transport capacity of the canal in this section, and reasonably determine the current water transport scale of the canal under comprehensive consideration of various related factors, providing technical support for the subsequent construction of the eastern route of south-to-north water diversion project.

**Key words:** south-to-north water diversion; water transmission capacity; comprehensive utilization; coupling model

收稿日期: 2024-05-15

作者简介: 李小红(1980—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利规划工作。E-mail: 14272139@qq.com

中运河(骆马湖—杨庄段)位于骆马湖以南,又称骆南中运河,为南水北调东线一期工程洪泽湖至骆马湖区间的骨干输水河道,与徐洪河输水线一起共同承担一期工程向北输水350~275 m<sup>3</sup>/s任务。

目前骆南中运河输水线已经按照一期工程230~175 m<sup>3</sup>/s输水规模实施完成。根据南水北调东线工程后续规划,骆南中运河还需与徐洪河输水线一并研究进一步扩大向北送水规模的可行性,故进一步复核研究现状骆南中运河的输水潜力是十分必要的。

## 1 基本情况

骆马湖以南中运河位于江苏省淮安市淮阴区和宿迁市泗阳县、宿城区、宿豫区境内,南起杨庄闸,北至皂河闸,全长111.2 km,其中杨庄闸—泗阳闸30.2 km,泗阳闸—刘老涧闸32.4 km,刘老涧闸—皂河闸48.6 km。

该河道既是京杭运河的一部分,也是南水北调东线一期工程的主要输水干线,现状为二级航道,同时还是黄墩湖和邳洪河地区的排涝干河,担负两岸农田灌溉、排涝任务,在必要时如有条件,还可相机排泄骆马湖部分洪水,是一条具有输水、航运、排涝、行洪等多功能的综合利用河道<sup>[1]</sup>。该段河道是南水北调东线工程的主要输水干线,也是黄墩湖和邳洪河地区的排涝干河,必要时通过皂河闸相机参与排泄骆马湖洪水500~1 000 m<sup>3</sup>/s。

根据南水北调总体规划<sup>[2]</sup>,后续工程出洪泽湖向北输水拟分别利用成子河和徐洪河直接引洪泽湖水北送。

## 2 输水能力分析

### 2.1 分析方法

南水北调东线后续工程洪泽湖向北输水分别有徐洪河和成子河两个口门,两者相距约18 km,为反映两条河道同时向北输水造成互相影响的可能性,对洪泽湖徐洪河口段和成子河口段分别建立徐洪河(洪泽湖顾勒河口—泗洪站)、成子河(洪泽湖口—泗阳站)一维模型和洪泽湖二维模型<sup>[3]</sup>,应用MIKE FLOOD进行一、二维耦合求解<sup>[4-8]</sup>,推求成子河现状河道的输水能力;其余河段利用明渠恒定非均匀流<sup>[9]</sup>推求现状河道的输水能力。

#### 2.1.1 河湖连接段

采用MIKE FLOOD一、二维耦合模型分析成子

河现状河道的过流能力。

#### (1) 一维河网水动力数学模型

MIKE 11 HD模型是基于垂向积分的物质和动量守恒方程,即一维非恒定流圣维南(Saint-Venant)方程<sup>[7]</sup>组来模拟河流或河口的水流状态。其方程组的具体形式为

$$\begin{cases} B_s \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x, t$ 分别为空间坐标和时间坐标; $Q, h$ 分别为断面流量和水位; $A, R$ 分别为断面过流面积和水力半径; $B_s$ 为水面河宽; $q$ 为单位河长的旁侧入流流量; $C$ 为谢才系数; $g$ 为重力加速度; $\alpha$ 为垂向速度分布系数, $\alpha = \frac{A}{Q^2} \int_A u^2 dA$ ,其中 $u$ 为断面平均流速。

#### (2) 二维河网水动力数学模型

基于 $x, y$ 右手笛卡尔直角坐标系的垂向积分二维浅水水动力方程组如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (2)$$

动量方程:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $t$ 为时间; $h$ 为总水深; $\eta$ 为水位; $u, v$ 分别为 $x, y$ 方向的流速; $p_a$ 为当地大气压; $\rho, \rho_0$ 分别为水的密度和参考密度; $f = 2\Omega \sin \varphi$ 为科氏力参数( $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 为地球自转角速率, $\varphi$ 为地理纬度); $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为水平黏性应力项; $S$ 为源汇项; $u_s, v_s$ 为源汇项流速; $\bar{u}, \bar{v}$ 分别为垂向平均流速。

侧压力 $T_y$ 包含了黏性摩擦、湍流摩擦和对流导数项,可采用基于水深平均流速梯度的涡黏公式来估计:

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, T_{yy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), T_{xy} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (5)$$

### (3)一、二维水动力耦合模型

一、二维水动力模型耦合方式不同,需满足的基本条件也略有不同,但大都基于质量守恒原则。其基本思路:在耦合处,同一时间步长内,在水流从一维模型向二维模型流动条件时,由一维模型解出一、二维模型节点处的物理量,作为二维模型的边界条件;反之则由二维模型在连接点处的出流值,作为连接处一维模型的边界条件,从而实现一维和二维之间的动态耦合。

$$\frac{\partial Q_n + 1/2}{\partial t} = - \left( gA \frac{\partial h_n}{\partial s} + g \frac{Q_n |Q_n|}{AC^2 R} \right) \quad (6)$$

#### 2.1.2 其他河段

结合一期工程现有梯级泵站分布,将该输水线分为两个相对独立河段,分别为泗阳站—刘老涧站段、刘老涧站—皂河站段,采用明渠恒定非均匀流方法推求现状河道的输水能力。

天然河道水面线计算一般采用恒定非均匀流能量方程计算,根据伯努利能量方程按照自下而上的断面顺序进行计算,其公式为

$$Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{Q^2 L}{K} + \xi \left( \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (7)$$

式中: $Z_1$ 、 $Z_2$ 分别为上、下游断面水位; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别为上、下游断面动能修正系数; $v_1$ 、 $v_2$ 分别为上、下游断面流速; $Q$ 为断面间洪水流量; $L$ 为上、下游断面间河道长度; $K$ 为流量模数; $\xi$ 为局部水头损失系数。

根据下游起推水位、断面形状、断面间距、设计流量等参数,推求上游各断面的设计水位,利用试算法逐步寻求最优解。

### 2.2 主要设计参数

(1)糙率。由于中运河河道沿线缺乏水文测站,无实测水位流量资料分析河道现状糙率,参考附近工程经验,并结合《灌溉与排水工程设计规范》(GB50288—99)提供的土渠糙率表,本次河道设计糙率河槽采用0.0225,河滩采用0.025。

(2)设计水位。考虑一期工程设计过程中,输水水位已进行过充分论证,与沿线的防洪、排涝、通航、灌溉等水位之间相互协调,同时自一期工程建成运行以来,河道各段输水运行平稳。因此,本次现状河道输水能力分析仍采用一期工程设计输水水位即:洪泽湖—泗阳站下为11.9~11.5 m,泗阳站上一刘老涧站下为16.5~16.0 m,刘老涧站上一皂河

站下为19.28~18.5 m。

### 2.3 分析成果

根据确定的骆南中运河沿线各节点输水水位对河道进行分段输水潜力分析,分析成果如下:

(1)成子河。该河道长约12 km,设计输水水位11.9~11.5 m,设计最低通航水位11.5 m,为连通南段中运河和洪泽湖的Ⅲ级航道,同时亦作为黄河故道的分洪道分泄宿迁市黄河故道仓集闸至众兴坝之间的洪水。经计算,在满足成子河河道设计输水水位要求条件下,现状河道输水能力约82 m<sup>3</sup>/s。该河道为一期工程实施后新辟河道,可为二期新增输水规模约82 m<sup>3</sup>/s。

(2)泗阳站—刘老涧站。该段河道长约30 km,设计输水水位16.5~16.0 m,设计最低通航水位16.0 m。经计算,在满足该段河道设计输水水位要求条件下,现状河道输水能力在一期输水230 m<sup>3</sup>/s规模基础上可增加约69 m<sup>3</sup>/s。

(3)刘老涧—皂河站。该段河道包括骆南中运河刘老涧—新邳洪闸段及新邳洪闸—皂河站段,长分别约为50 km、3.2 km,设计水位19.28~18.5 m,设计最低通航水位刘老涧—宿迁闸18.0 m、宿迁闸—皂河闸18.5 m。经计算,在满足该段河道设计输水水位要求条件下,现状河道输水能力在一期输水230~175 m<sup>3</sup>/s规模基础上可增加约25 m<sup>3</sup>/s。

## 3 关联因素分析

骆南中运河现状河道输水能力大小主要受河道设计输水水位的影响,因该段河道具有多种综合利用功能,除考虑河道需满足向北送水水位外,还需考虑航运、生态、沿线农业灌溉等对水位的需求,在确保各行业综合权益较大化的前提下研究抬高站上水位的可能性,以增加河道输水能力。

#### (1)防洪水位

骆南中运河具有相机分泄骆马湖洪水的功能,根据皂河闸历年下泄骆马湖洪水流量情况,按照皂河闸相机参与排泄骆马湖洪水1 000 m<sup>3</sup>/s进行复核计算,骆南中运河各主要节点设计洪水水位分别为:泗阳闸下15.99 m(废黄河高程,下同)、泗阳闸上16.83 m、刘老涧闸下18.89 m、刘老涧闸上19.22 m、皂河闸下21.83 m。

#### (2)通航水位

骆南中运河属于京杭运河苏北段的一段,航道标准等级为2级,南水北调东线二期工程涉及泗阳

站—皂河站之间河段,其中泗阳站—刘老涧段最低通航水位 16.0 m、最高通航水位 18.6 m;刘老涧—宿迁闸段最低通航水位 18.0 m、最高通航水位 19.5 m;宿迁闸—皂河闸段最低通航水位 18.5 m、最高通航水位 24.0 m;成子河段最低通航水位 11.5 m、最高通航水位 14.5 m。

二期工程规划新增成子河输水线,2014年交通部门已按照Ⅲ级航道标准对成子河进行整治,设计最低通航水位 11.5 m、最高通航水位 14.5 m。

### (3)生态水位

河湖生态水位是维持河湖生态系统结构和功能完整性、维持生物多样性的最低水位,确定河湖生态水位对于水资源管控和优化调配、修复河湖生态功能、保障河湖整体生态系统具有重要意义。中运河各段生态水位为:杨庄—泗阳段位 10.1 m、泗阳—刘老涧段为 15.0 m、刘老涧—皂河闸为 17.4 m。

### (4)一期工程输水水位

根据《南水北调东线第一期工程可行性研究报告》及实施情况,骆南中运河沿线设计输水水位分别为:洪泽湖 11.9 m、泗阳站下 10.5 m、泗阳站上 16.5 m、刘老涧站下 16.0 m、刘老涧站上 19.28 m、皂河站下 18.5 m、皂河站上 23.0 m。

综合考虑骆南中运河防洪、送水、航运、生态等综合功能,河道现状输水能力分析水位仍采用一期工程输水水位,由此分析出中运河(成子湖—骆马湖段)全线现状河道输水能力在一期输水 230~175 m<sup>3</sup>/s 规模基础上可增加约 25 m<sup>3</sup>/s。

## 4 结 论

分析并充分挖掘南水北调现有河道输水潜力是研究南水北调后续工程规模的一个重要任务,本

文通过建立成子河、徐洪河湖口段一维模型和洪泽湖二维模型进行一、二维耦合求解的方法、梳理了河道设计糙率、水位等参数,提出了骆南中运河(骆马湖—成子湖段)现状河道输水能力在一期输水 230~175 m<sup>3</sup>/s 规模基础上可增加约 25~82 m<sup>3</sup>/s。综合考虑防洪、航运、生态等综合利用功能,受刘老涧—皂河站河道规模制约,现状工况下骆南中运河线可增加输水规模约 25 m<sup>3</sup>/s 即现状河道输水能力为 255~200 m<sup>3</sup>/s。

### 参考文献:

- [1] 郭玉雪,张劲松,郑在洲,等.南水北调东线工程江苏段多目标优化调度研究[J].水利学报,2018,49(11):1313-1327.
- [2] 周君亮.南水北调东线工程规划布局商榷[J].江苏水利,2002(1):4-6.
- [3] 王船海,程文辉.河道二维非恒定流场计算方法研究[J].水利学报,1991(1):10-17.
- [4] 刘薇,彭新德,张小兵.一、二维耦合水流数值模拟在防洪评价中的应用[J].中国水运,2010,10(6):112-113.
- [5] 马天海,孙娟,颜建波.基于MikeFlood阳澄湖一二维水动力耦合模型研究[J].水科学与工程技术,2018(1):25-29.
- [6] 赖锡军,汪德燿.非恒定水流的一维、二维耦合数值模型[J].水利水运工程学报,2002,6(2):48-51.
- [7] 栾广学,侯精明,杨露,等.耦合高效高精度水动力模型的多组分污染物输移及衰减反应模型[J].水资源保护,2022,38(6):131-137,161.
- [8] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等.城市二维内涝模型的GPU并行方法[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533.
- [9] 伍宁.一维圣维南方程组在非恒定流计算中的应用[J].人民长江,2001,11(32):16-18.