

# 南水北调东线二期半专道输水方案对 淮河入江水道行洪能力影响研究

饶贵康<sup>1,2</sup>, 徐 津<sup>1,2</sup>, 王玲玲<sup>1,2</sup>, 胡礼涵<sup>1,2</sup>, 唐洪武<sup>1,2</sup>

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**淮河入江水道是淮河下泄洪水的主要通道, 承担来自淮河中上游约66%~79%的洪水, 是淮河行洪的安全阀。为了研究南水北调东线二期半专道输水方案对淮入江水道行洪的影响, 建立北抵洪泽湖三河闸、南至长江三江营的一二维水动力数学模型, 在设计洪水工况下分析工程方案对入江水道行洪的影响。结果表明: 工程实施后, 入江水道上段、下段行洪水位低于设计值; 中段邵伯湖由于东侧修建隔堤侵占河道, 行洪时部分区域水位有少量抬高, 当对新民滩南部实施切滩补偿后, 可有效消除其影响。

**关键词:**南水北调; 淮河入江水道; 半专道输水方案; 一二维耦合; 行洪

中图分类号: TV212

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)02-0014-0005

## Study on the impact of semi-special road water delivery scheme in second phase of east route of the South-to-North Water Transfer Project on the Flooding Capacity of the Huaihe River Intake Channel

RAO Guikang<sup>1,2</sup>, XU Jin<sup>1,2</sup>, WANG Lingling<sup>1,2</sup>, HU Lihan<sup>1,2</sup>, TANG Hongwu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The Huaihe River Intake Channel is the main channel for flood discharge from the Huaihe River, bearing about 66%~79% of the flood from the middle and upper reaches of the Huaihe River and is the safety valve for flood discharge in the Huaihe River. In order to study the impact of the semi special road water delivery scheme of the second phase of the east route of the South-to-North Water Transfer Project on the flood discharge of the Huaihai River Channel, a two-dimensional hydrodynamic mathematical model is established to reach the Sanhe Sluice of Hongze Lake in the north and the Sanhe Camp of the Yangtze River in the south, and the impact of the project scheme on the flood discharge of the river channel is analyzed under the design flood conditions. The results show that after the project is implemented, the flood discharge water level of the upper and lower reaches of the river channel is lower than the design value; Since the east side of Shaobo Lake in the middle section has built a partition dike to encroach on the river channel, the water level in some areas has been raised slightly during flood discharge.

收稿日期: 2022-09-27

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3200032); 国家自然科学基金项目(51879086); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(B200204044); 江苏省水利科技项目(2021001); 中国长江三峡集团有限公司(202003251)

**作者简介:** 饶贵康(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学数值模拟研究。E-mail: 3541884208@qq.com

**通信作者:** 王玲玲(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事水力学数值模拟研究。E-mail: wanglingling@hhu.edu.cn

The impact can be effectively eliminated after beach cutting compensation is implemented in the south of Xinmin Beach.

**Key words:** the South-to-North Water Diversion Project; the Huaihe River Intake Channel; semi-special road water delivery scheme; One-dimensional and two-dimensional coupling; Discharge flood

## 1 研究区域概况

淮河入江水道位于苏皖两省交界处,设计行洪  $12\,000\text{ m}^3/\text{s}^{[1-3]}$ ,是淮河流域洪泽湖下泄洪水的主要通道,并兼有排涝、灌溉、航运、养殖等综合功能。入江水道横跨淮河与长江两大流域:北抵洪泽湖三河闸、南至长江三江营,分为上、中、下3段,全长  $157.2\text{ km}$ 。入江水道分泄淮河  $70\%$ 左右的洪水,是淮河行洪的安全阀,也是沿线天长、高邮、扬州等重要城市的战略水源地,为当地的经济和工农业的发展提供生产生活用水。

为了解决北方日益增长的水资源需求,国家正在加快推进南水北调东线二期工程的建设步伐<sup>[4]</sup>,在一期工程的基础上扩大东线工程江水北调的能力。淮海入江水道由于其得天独厚的地理位置,成为东线二期工程长江至洪泽湖段重点研究论证的输水路线。目前的规划方案中有全湖、专道及半专道3种输水方案,半专道方案是主要方案之一,其输水路线如图1所示。该方案利用淮河入江水道,自长江干流三江营开始抽水,沿夹江、廖家沟等河段向北送水至洪泽湖三河闸。输水工程对入江水道

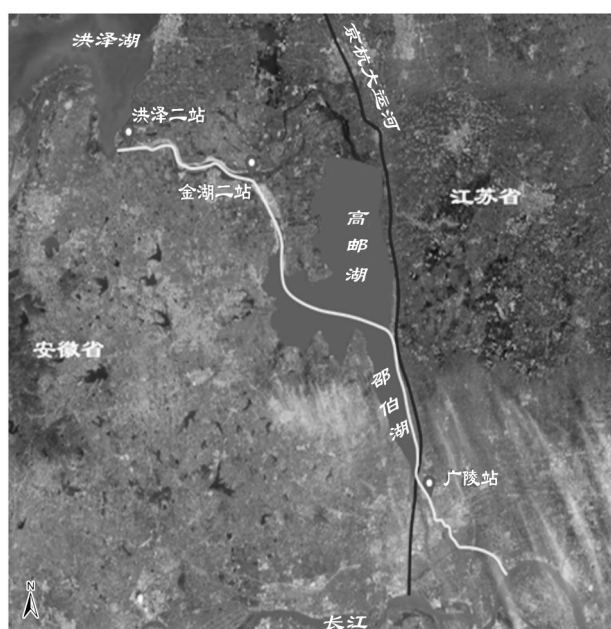


图1 半专道方案输水路线

拟采取一系列工程措施,如高邮湖、邵伯湖抽槽,金湾河、芒稻河拓浚开挖,邵伯湖东侧修建专道隔堤等。上述工程尤其隔堤工程的修建侵占邵伯湖区,势必会对入江水道中段的行洪产生一定影响。因此,本文结合研究区域河、湖、滩、圩串并相连的特点,采用数值模拟方法构建淮河入江水道一维、二维耦合水动力数值模型,选用2007年实测洪水对耦合模型进行率定,在此基础上进一步分析半专道工程方案实施前后入江水道的行洪能力变化。

## 2 一维、二维耦合数值模型

### 2.1 一维模型控制方程

三河与三河改道段、六闸站至三江营的归江段采用一维河网模型,控制方程为圣维南方程组,包括连续方程和动量方程:

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_1 \frac{\partial Z}{\partial t} = q \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{|Q|Q}{c^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: $x$ 、 $t$ 分别为笛卡尔坐标及时间; $Q$ 为断面流量; $Z$ 为断面水位; $B_1$ 为当量河宽,等于河宽与附加滩地宽度; $q$ 为单位河长的旁侧入流量; $\alpha$ 为动力校正系数; $A$ 为断面面积; $g$ 为重力加速度; $c$ 为谢才系数; $R$ 为水力半径。该方程组采用六点 Abbott-Ionescu 隐式差分格式<sup>[5]</sup>进行离散,并用追赶法<sup>[6]</sup>进行数值求解。

### 2.2 二维模型控制方程

高邮湖区、新民滩滩地、邵伯湖区、邵伯湖滩群采用二维浅水方程模拟其水动力:

连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{wx} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{wy} \quad (5)$$

式中:  $t$  为时间;  $u$  和  $v$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的平均流速分量;  $h$  为总水深;  $g$  为重力加速度;  $S_{0x}$  和  $S_{fx}$  分别是  $x$  向的水底底坡和摩阻坡度;  $S_{0y}$  和  $S_{fy}$  分别是  $y$  向的水底底坡和摩阻坡度;  $S_{wx}$  和  $S_{wy}$  分别为  $x$  和  $y$  方向的风应力。

### 2.3 一维、二维耦合原理

一维、二维模型耦合按照空间连接方式分为侧向耦合与纵向耦合。侧向耦合主要用于模拟河流主槽及洪泛区之间的水量交换及水动力过程,纵向耦合广泛应用于上下游联解的河湖系统,以及溃坝模拟<sup>[6]</sup>。根据淮入江水道的河湖连接关系拟采用纵向耦合。

目前求解该类耦合的方法主要有2种:(1)重叠区域算法。将一维、二维模型区域延长一段重叠段求解<sup>[7]</sup>;(2)边界迭代法。无需重叠段,在模型连接断面处通过虚拟一条耦合线进行连接,根据水位流量相同求解<sup>[8]</sup>。本次模拟采用第二种方法,一维河网与二维湖泊模型的水力因子通过虚拟耦合线进行传递<sup>[9]</sup>,无需重叠一维河段来传递水力因子,避免了口门处二维网格尺度的严苛要求。为检验所使用的一维、二维模型耦合模块的可靠性,利用梁东方等<sup>[10]</sup>设置的耦合算例进行验证,如图2所示。

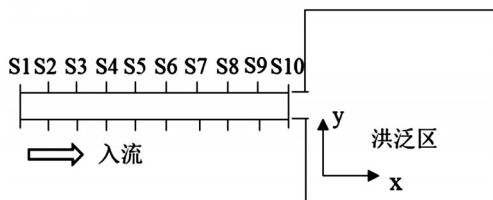


图2 一维、二维模型耦合算例示意

该算例由一条顺直河道与平底洪泛区构成,底高程均为0。一维河道为矩形断面、河道宽4 m,长360 m,等间距划分为S1至S10共10个断面;二维洪泛区为边长200 m的正方形,四周为不过水边界。初始时刻模型中的水位为0.5 m,一维河道上游流量采用非恒定过程,流量在10 min内由0线性增加到4 m<sup>3</sup>/s后保持恒定。图3给出了S1、S10断面水位计算值与文献值随时间的变化规律,其NSE系数分别为0.975、0.983。图4是一维河道在 $t=6$  min与 $t=30$  min时的沿程水面坡降,由图4可知计算值与文献值结果接近,NSE系数分别达到了0.981、0.986,表明耦合模型模拟精度较高。

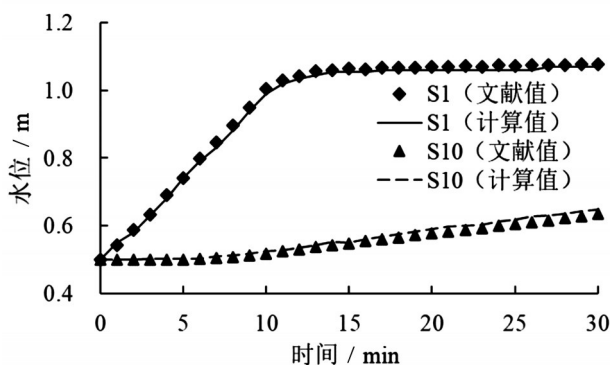


图3 S1、S10断面水位变化

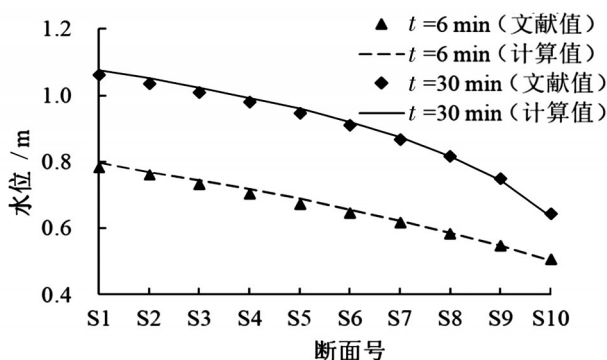


图4 一维河道水面坡降变化

## 3 模型建立

### 3.1 计算范围及网格划分

本次模型的计算范围北起洪泽湖三河闸、南至长江三江营,全长157.2 km。一维数值模型中概化河道有12条,分别为三河及改道段、省界至六闸段、六闸段至壁虎河、廖家沟、太平河、金湾河、芒稻河、壁虎河、凤凰河、新河、夹江,八江口,控制断面共236个。二维数值模型中概化区域有高邮湖、邵伯湖、新民滩以及邵伯湖群滩,面积约871 km<sup>2</sup>,网格剖分采用三角形网格和四边形网格相结合的方式,地形变化较大的区域进行网格加密,网格单元共11 158个,网格节点7 715个,一、二维耦合模型示意图见图5,沿线拥有中渡、金湖、施尖、高邮(高)等水位监测点。

### 3.2 模型率定

2007年淮河流域自北向南普降暴雨,入江水道沿线水闸全开泄水。此次洪水来水量大,河湖水位变化明显,适合作为数学模型的率定资料。选取2007年入江水道汛期实测洪水数据对耦合模型进行率定。模型上边界采用三河闸实测流量过程,下边界采用三江营实测潮位数据,模拟时段入江水道



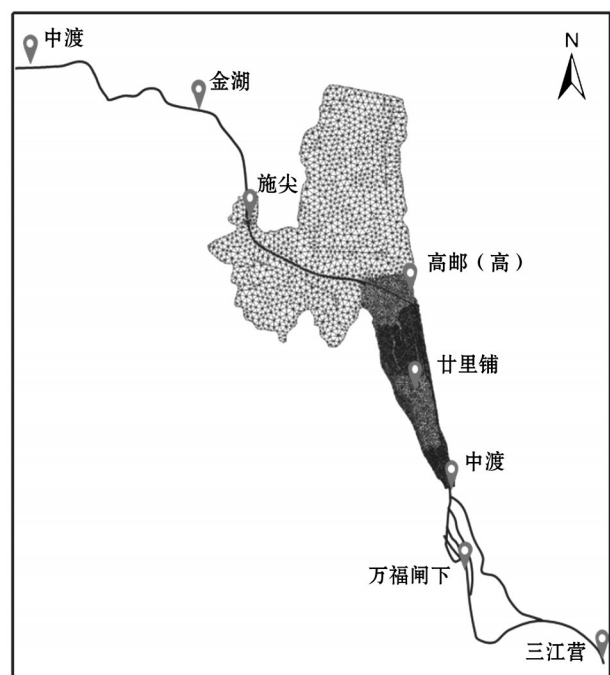


图5 一、二维耦合模型示意

沿线闸门全开。率定得出一、二维模型河湖区域的糙率值,如表1所示。

表1 模型率定糙率

河段	糙率	河段	糙率
三河闸-金湖	0.023	凤凰河	0.030
金湖-漫水闸	0.029	新 河	0.030
三河改道段	0.041	芒稻河	0.022
省界-六闸段	0.040	夹 江	0.018
六闸-壁虎河	0.040	八江口	0.020
廖家沟	0.022	高邮湖	0.021
金湾河	0.027	邵伯湖	0.027
太平河	0.018	新民滩	0.033

图6是区域内水文测站中渡、金湖、高邮(高)在7月25~31日的水位率定结果。由图6可知,3个站点的水位计算值与实测值吻合良好,纳什效率系数均达到了0.950以上,表明耦合模型精度较高,能够准确模拟入江水道的水动力过程。

#### 4 工程方案及行洪影响分析

东线二期半专道输水方案的输水起点位于长江三江营,沿夹江、芒稻河、金湾河等河段向北输水。金湾闸附近拟建抽江泵站广陵站抽水入邵伯湖,在邵伯湖东侧滩地筑隔堤与运河西堤形成河道

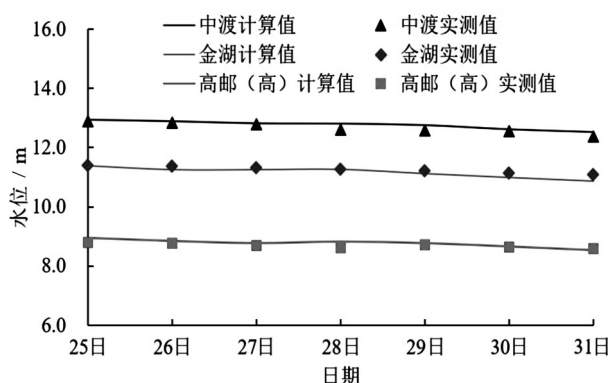


图6 2007年7月25—31日水位率定结果

送水入高邮湖,入江水道金沟改道段西偏泓从高邮湖引水经金湖梯级抽水入三河,最后由洪泽梯级抽水入洪泽湖。整个方案工程参数如下:

(1)芒稻河8.4 km河道拓浚及河坡防护;(2)金湾河12.2 km的河道疏浚与防护;(3)深泓河扩挖9 km;(4)金钩改道段扩挖以及三河段36 km的疏浚;(5)高邮湖抽槽31.9 km;(6)邵伯湖东侧修建19.5 km隔堤,设计堤顶高程6.83 m,顶宽5 m,深泓河段顶宽7.53 m。根据淮河入江水道的行洪要求,利用所建数学模型复演设计洪水工况下半专道工程方案对入江水道行洪的影响,设置上边界三河闸来流12 000 m<sup>3</sup>/s,下边界三江营水位5.66 m。计算得沿线主要站点水位见表2。

表2 入江水道沿程站点水位

站点	设计值/m	模拟值/m	水位差/cm
中渡	14.120	14.118	-0.2
金湖	12.140	12.134	-0.5
施尖	9.800	9.778	-2.2
高邮(高)	9.500	9.462	-3.8
甘里铺	9.130	9.148	1.8
六闸	8.500	8.472	-2.8
万福闸下	7.000	6.936	-6.4
三江营	5.660	5.660	0.0

根据计算结果可知,二期工程对淮河入江水道相关河段进行开挖拓浚、高邮湖邵伯湖进行抽槽后,三河闸下泄12 000 m<sup>3</sup>/s的设计洪水时入江水道上段(三河闸至施尖)、下段(六闸至三江营)的沿程水位均将低于设计值,各站点水位下降幅度在0.2~6.4 cm之间,满足入江水道行洪设计要求;但新民滩南部的甘里铺水位模拟值相比设计值高出1.8 cm,水位出现抬高现象,表明工程实施后会降低邵伯湖

局部区域的行洪能力。其原因应是湖区东侧修建的专道隔堤侵占了约  $76 \text{ m}^2$  的过水断面,削减了邵伯湖的行洪空间。为此,需要实施相关切滩措施来消除隔堤工程带来的不利影响。

根据半专道方案的设计要求,拟考虑在新民滩尾间进行切滩补偿,如图7所示,切滩范围为新民滩控制线以南,靠近水道西岸的两处滩地,两滩地原高程在  $4.0 \sim 5.8 \text{ m}$  之间,切滩面积约  $345.8 \text{ hm}^2$ ,切滩底高程  $3.33 \text{ m}$ ,切滩土方量约  $325.24 \text{ 万 m}^3$ 。利用模型模拟切滩后的水动力场,得到设计洪水工况下入江水道沿线各站点的水位值,见表3。结果显示,切滩后沿线各站点水位均低于设计值,邵伯湖区廿里铺的水位模拟值约为  $9.117 \text{ m}$ ,相比于设计值降低了  $1.3 \text{ cm}$ ,相比于切滩前降低了  $3.1 \text{ cm}$ ;此外,高邮湖区的高邮(高)、邵伯湖南端的施尖水位相比切滩前均有明显的水位下降。本次模拟结果表明,在邵伯湖内实施切滩工程,基本可以消除隔堤侵占湖区对行洪带来的不利影响。

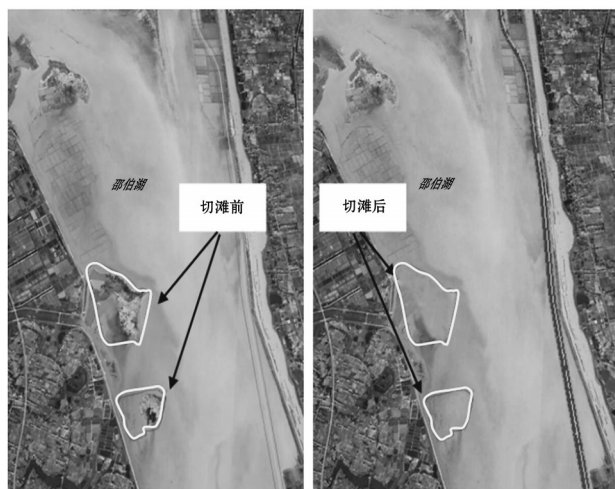


图7 邵伯湖尾间切滩前后对比

表3 切滩后入江水道沿线站点水位

站点	设计值/m	模拟值/m	水位差/cm
中 渡	14.120	14.118	-0.2
金 湖	12.140	12.134	-0.6
施 尖	9.800	9.772	-2.8
高邮(高)	9.500	9.443	-5.7
廿里铺	9.130	9.117	-1.3
六 闸	8.500	8.463	-3.7
万福闸下	7.000	6.932	-6.6
三江营	5.660	5.660	0.0

## 5 结 语

本文基于 MIKE FLOOD 一维、二维耦合模块,建立了北抵洪泽湖三河闸、南至长江三江营的一维、二维耦合水动力模型,计算分析了南水北调东线二期工程半专道输水方案对淮河入江水道行洪的影响,得到以下结论:

(1)耦合模型经2007年实测洪水率定后,水位计算值与实测数据吻合良好,模型具有较高精度,可较准确地模拟入江水道水动力过程。

(2)设计洪水工况下,半专道输水方案对入江水道上段、下段的行洪安全造成的影响可控;中段邵伯湖区域由于东侧修建隔堤侵占河道,行洪时局部区域水位出现抬高现象,廿里铺的模拟水位超过了设计值,对行洪不利。

(3)对新民滩尾间实施切滩补偿后,基本可以消除隔堤侵占河道带来的不利影响,整体方案实施后入江水道的行洪满足设计要求。

### 参考文献:

- [1] 孙正兰. 淮河入江水道行洪能力分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 50-55, 61.
- [2] 钱睿智, 王永东, 薛军, 等. 淮河入江水道新民滩控制线行洪能力变化分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(7): 58-60, 65.
- [3] 赵永俊, 赵瑾, 申迪, 等. 2016年淮河入江水道行洪能力测验与分析[J]. 治淮, 2017(12): 89-90.
- [4] 陶佳辉, 卞锦宇, 敖天其, 等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 133-141.
- [5] 赵蕾蕾, 张玉杰. 基于 Mike11 一维河道溃决模型的暗渠洪水风险分析[J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(9): 24-25.
- [6] 刘芹, 方国华, 孙洪滨, 等. 环状河网堰闸过流追赶系数计算方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2015, 30(5): 571-579.
- [7] 徐祖信, 尹海龙. 平原感潮河网地区一维、二维水动力耦合模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2004(6): 744-752.
- [8] 诸裕良, 严以新, 李瑞杰, 等. 河网海湾水动力联网数学模型[J]. 水科学进展, 2003(2): 131-135.
- [9] 董小雨, 王玲玲, 唐洪武, 等. 淮河入江水道水动力数值模拟研究[J]. 人民长江, 2015, 46(3): 14-17.
- [10] LIANG Dengfang, FALCONER R A, LIN B. Linking one-and two-dimensional models for free surface flows[J]. Water Management, 2007, 160(3): 145-151.