

南水北调南四湖输水二维流场数值模拟及应用

武周虎¹, 付莎莎², 罗辉³, 刘长余⁴, 赵培青⁴

(1. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033; 2. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029;
3. 山东省南水北调工程建设管理局, 济南 250013; 4. 山东省水利勘测设计院, 济南 250013)

摘要: 由于南四湖错综复杂的地形变化和湖盆特征, 若采用传统一维总流算法进行湖内开挖疏浚工程的水力计算, 将会影响输水工程的可靠性。因此, 以南四湖万分之一地形图(CAD版)和卫星遥感影像资料为基础, 创建了南四湖深度平均平面二维水流数学模型体系, 并进行了模型验证。在南四湖调水设计方案条件下, 开展了上、下级湖二维流场的数值模拟试算, 确定了同时满足正常设计和特殊干旱运行控制点水位要求的最小规模开挖方案。流场分析表明, 南四湖输水时上、下级湖全湖区在水位差的作用下呈现由南向北流场方向的单一性特点; 主航道平均流速为 0.12 m/s, 一般高于非主航道区一个数量级左右; 输水主航道平均流量比例为 61.5%, 最大可承担 88.9%, 说明南四湖湖内主航道承担着主要输水功能。

关键词: 南水北调; 南四湖; 输水流场; 数学模型; 输水航道; 开挖疏浚

中图分类号: TV13; TV68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0017-07

Two dimensional Numerical Simulation and Its Application of Water Transfer in Nansi Lake of South to north Water Transfer Project

WU Zhou hu¹, FU Sha sha², LUO hui³, LIU Chang yu⁴, ZHAO Pei qing⁴

(1. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China; 3. Shandong Bureau of Construction and Management of the South to North Water Diversion Project, Ji nan 250013, China; 4. Shandong Institute of Water Resources Reconnaissance and Design, Ji nan 250013, China)

Abstract: Due to the complex terrain changes and characteristics of Nansi Lake Basin, the reliability of water transfer project can be affected if the traditional one dimensional total flow method is used in the hydraulic calculation of dredging project in the lake. In this study, a depth averaged two dimensional mathematical flow model system of Nansi Lake was created and verified on the basis of 1/10000 scale topographic map (CAD version) and satellite remote sensing images of Nansi Lake. Under the conditions of design water transfer scheme, the flow fields of the upper and lower Nansi Lake were simulated using the two dimensional mathematical model. The dredging program with the smallest amount of excavation was determined in order to meet the requirements of water level at control locations under both normal design and special drought conditions. Analysis of the flow field results indicated that the flow field in the whole lake, both in the upper and lower lakes, showed single directional feature from south to north during the process of water transfer. The average flow velocity in the main channel was 0.12 m/s, generally about one order of magnitude higher than that in the non main channel regions. The main channel of Nansi Lake played the major role in water transfer as its average flow rate accounted for 61.5% of the total flow rate and its maximum capability can reach 88.9%.

Key words: South North Water Transfer; Nansi Lake; flow field of water transfer; mathematical model; main channel of water transfer; excavation and dredging

1 研究背景

南水北调东线工程从长江下游扬州附近抽引长江水, 自

江苏中运河由韩庄老运河和不牢河、郑集河分两路进入山东南四湖下级湖, 经二级坝泵站提水入上级湖, 再经梁济运河长沟、邓楼和柳长河八里湾三级泵站提水入东平湖, 自东平

收稿日期: 2013-08-20 修回日期: 2013-11-07 网络出版时间: 2014-05-07
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.004.html>
基金项目: 山东省南水北调工程建设指挥部资助项目(2003-01)
作者简介: 武周虎(1959-), 男, 陕西岐山人, 教授, 主要从事水力学、水环境模拟与污染评估研究。E-mail: wu_zh2008@aliyun.com

湖分两路向胶东和鲁北、河北及天津供水。东线输水渠道的 90% 是利用京杭大运河及与其平行的河道和湖泊,南四湖则是其重要的输水通道和调蓄湖泊之一^[1]。南四湖位于山东省西南部济宁市,是南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖四个由西北向东南相连而成湖泊的总称,流域面积 31 700 km²。南四湖内总面积 1 266 km²,南北狭长 126 km,东西宽 5~25 km,岸线总长 311 km。在湖中部最窄的湖腰建有二级闸坝水利枢纽工程,将其分成上级湖和下级湖。二级闸坝以北为上级湖,湖内面积 606 km²,二级闸坝以南为下级湖,湖内面积 660 km²。南四湖天然水流是由北向南经上级湖泄水入下级湖再入中运河,而南水北调东线南四湖输水是由下级湖南端进入,经二级坝泵站、由上级湖北端入梁济运河^[2]。

目前,对于南四湖输水能力的水力计算一般仍采用一维明渠恒定非均匀渐变流的逐段试算法,其计算结果无法反映湖内水流的实际流动情况,水面曲线的计算误差难以估计,给南四湖输水航道开挖疏浚工程设计带来一定的困难^[3-5]。关于浅水湖泊风生流的研究较多,马生伟等^[6]采用迎风有限元方法模拟了太湖的风生流;张萍峰等^[7]利用二维水动力学模型研究了滇池的风生流;武周虎等^[8]研究了调水期南四湖上、下级湖在南风、东南风和北西风情景下的风生流流场;骆辉煌等^[9]基于南四湖 100 m 精度的 DEM 地形数据,采用平面二维水动力学模型研究了南四湖调水情景下不同风向的水动力特性,由于所采用的地形数据精度不能有效地反映南四湖航道和错综复杂的地形特征,忽视了湖内主航道的主要输水功能,其结果与实际情况有较大偏差。总之,平面二维水动力学模型的研究均未涉及采用浅水动力学二维数学模型研究湖泊输水航道开挖疏浚、水面曲线和特征水位等工程计算问题。

本文基于 SMS(Surface Water Modeling System)地表水模拟系统创建适合南四湖深度平均平面二维水流数学模型体系,根据南水北调东线一期工程南四湖设计方案,进行南四湖输水航道开挖疏浚方案的优化模拟与计算,确定最佳开挖位置、长度和底宽,给出满足设计输水流量时的水面曲线和特征水位,开展湖内输水流场分析,以增强南四湖输水工程设计的可靠性、合理性和科学性。该研究成果已作为南四湖湖内开挖疏浚工程设计的科学依据和技术支持,对其它湖泊、水库类似工程的水力计算具有借鉴意义。

2 数学模型

2.1 控制方程

南四湖湖盆呈浅平形,湖水不深,一般情况下,除京杭大运河湖内航道外,大部分湖区水深不及 1 m,最深处在微山岛以南,水深 3 m 左右。基于此,采用深度平均的平面二维数学模型,相应的浅水动力学基本控制方程包括两个运动方程和一个连续方程,控制方程组为^[10]:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} (E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + gh(\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{g \omega n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta W^2 \cos \Psi - 2h \omega v \sin \varphi = 0 \quad (1)$$

$$gh(\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{g \omega n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta W^2 \sin \Psi + 2h \omega u \sin \varphi = 0 \quad (2)$$

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

式中: h 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量; x 、 y 为正交坐标; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; E 为水平涡黏性系数张量; z_b 为湖底高程; n 为糙率系数; ω 为地球自转角速度; φ 为当地纬度; ζ 为风应力系数; W 为当地风速; Ψ 为风向与 x 方向的逆时针夹角。

南四湖调水正常设计方案的上、下级湖出湖口水位均为其相应的死水位,特殊干旱设计方案的上、下级湖出湖口水位则低于相应的死水位 0.30 m。湖内地形情况复杂,水生植物种类繁多,各级航道、深槽、芦苇、湖草、莲藕、鱼池、湖田、河沟、庄台建筑物等纵横交错情况遍布湖区。湖内水体面积占湖区面积的 45.53% 以下^[11],非航道区水深一般很浅或沼泽化,多为湿地植物保护区。受各种植物、芦苇荡分布的阻隔作用,非航道区糙率增大,风生大环流难以形成主导作用。文献[12]在南四湖调水正常设计方案平均风速 3.3 m/s 的条件下,模拟了 NW、N、S、SE 风向和无风情况下的上、下级湖调水流场和水面线,结果表明有风比无风情况下的上级湖控制点水位相差范围为 -0.02~0.02 m,下级湖控制点水位相差范围为 0~0.02 m,其水位差的相对影响误差均小于 5.0%。因此,对南四湖调水设计方案来讲,风力的影响可以忽略;文献[8-9]的研究同样说明了这一点,因此本文不考虑风力作用。

采用伽辽金有限元法求解上述方程组,借助于美国研制的 SMS 地表水模拟软件支持系统,以南四湖湖区万分之一地形图(2001 年 CAD 版,标有实测苇草分布,1985 年国家黄海高程基准,下同)和卫星遥感影像资料^[11]为基础,根据南四湖上、下级湖湖底地形、地势和岸线变化等边界特征,进行结点/网格划分、输入结点高程和单元介质类型、进行网格质量检查、SMS 程序调试与运行、参数选取设置与模型验证,实现不同调水设计方案条件下的南四湖上、下级湖输水流场模拟。

2.2 单元网格划分

按照有限元网格划分的总体原则^[10],对南四湖上、下级湖分区进行结点/网格划分,网格疏密过渡均匀,无突变现象。其中一组网格线的走向尽量与流线一致,单元网格以四边形为主,采用沿流向的边长大于另一边长的长方形单元网格,局部采用三角形和加密网格以适应不规则边界形状的变化。在航道、深槽、沟渠、堤防、台田以及鱼塘岛屿附近水深变化较大或边界形态变化复杂的地方加密单元网格,以适应边界突变引起的水力要素变化。

上级湖计算域的进、出流边界是二级坝泵站、北至梁济运河口,上级湖至梁济运河口的输水航道不穿越小北湖,上级湖输水线路全长 69.605 km。计算域对应桩号 0+000(梁济运河口)沿湖内主航道由北向南至 69+605(二级坝泵站)。上级湖二级坝上航道贯通至调水泵站出水渠口,底宽 110 m、底高程 29.3 m,边坡系数=1:5。上级湖湖区共划分为 7 716 个单元,其中三角形单元为 2 267 个,四边形单元为 5 449 个,节点 22 965 个,见图 1(a)。下级

湖计算域的进、出流边界是湖区东南的韩庄老运河口、西南的郑集河口、北至二级坝泵站引水渠口,下级湖输水线路(含二级坝泵站引水渠)全长 45.812 km。计算域对应桩号 72+046(二级坝泵站引水渠口)沿湖内东股航道由北向南至 115+417(韩庄老运河口)。下级湖湖区共划分为 6 758 个单元,其中三角形单元为 1 604 个,四边形单元为 5 154 个,节点 17 434 个,见图 1(b)。

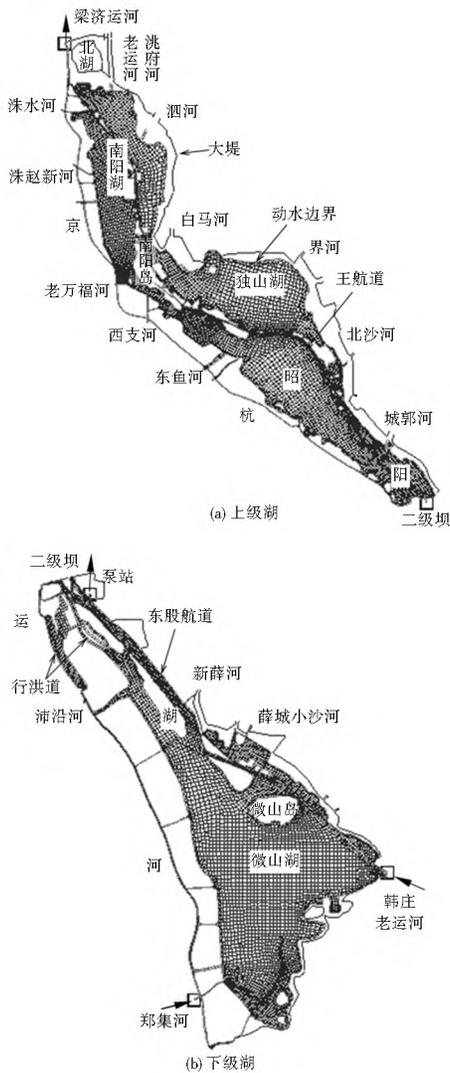


图 1 南四湖计算域及网格划分
Fig. 1 Computational domain and mesh discretization in the Nansi Lake

3 参数选取与模型验证

3.1 参数选取

南四湖湖内地形和植被覆盖情况十分复杂。因此,根据南四湖万分之一地形图和卫星遥感影像资料^[11]的分析结果,在数学模型中确定出上、下级湖不同的介质类型和分布区域,见图 2(a)和图 2(b)。

糙率 n 是表征边界表面及水体中障碍物对水流阻力影响的各种因素的一个综合阻力系数,湖区植被覆盖的介质类型不同其糙率差别很大,对水流数学模型计算结果的影响很大^[13-14]。在 20 世纪 60 年代的行洪测验分析中,将南四湖湖内糙率概化为航道(深槽)、芦苇、湖草、明湖四种情况,确定

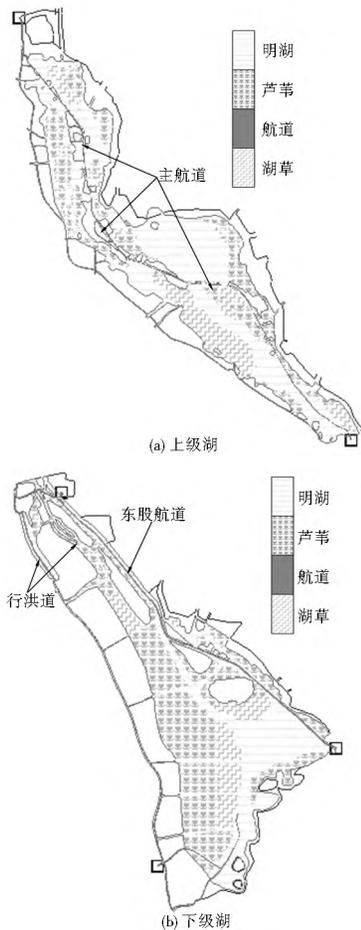


图 2 南四湖湖区植被覆盖的介质类型分布

Fig. 2 Distribution of vegetation cover types in the Nansi Lake
出各种情况的糙率分别为:航道 $n = 0.030$; 芦苇 $n = 0.796 h^{-2/3}$; 湖草 $n = 0.226 h^{-2/3}$; 明湖 $n = 0.084$, 其中 h 为平均水深¹。上述糙率主要用于洪水计算,而南水北调东线南四湖输水时设计水位较低,虽然设计调水由湖面输水,但主要由航道承担。根据淮河水利委员会的意见,确定将航道糙率调整为 $n = 0.025$ 作为设计值,其它植被覆盖分类的糙率仍采用原测验成果。

3.2 模型验证

湖泊水动力学的实质是明渠流。根据谢才公式:流速 $u = h^{2/3} J^{1/2} / n$, 在湖区原地形和介质糙率一定的条件下,水深 h 和水面比降 J 的大小取决于水面线分布^[15]。根据南四湖上、下级湖水位、流场二维数学模拟的定性分析,在统一的网格单元划分、数学建模和模型调试的基础上,进行了由北向南(缓坡)和由南向北(逆坡)的输水计算。计算条件均取各湖泊一期工程正常设计调水流量和出湖口水位,湖区地形和介质糙率取相应值。南四湖上、下级湖缓坡、逆坡输水纵向水面线二维数学模拟计算结果见表 1 和图 3。

由表 1 和图 3 看出,南四湖上、下级湖由北向南输水均为缓坡流,水面线遵循缓坡 A₁ 型水面曲线,由南向北均为逆坡流,水面线遵循逆坡 B 型降水水曲线。因此,上、下级湖缓坡、逆坡输水水面线二维数学模拟计算结果符合水力学水面

¹ 引自《南水北调东线第一期工程南四湖-东平湖段工程可行性研究报告》(上册),2004 年 4 月。

表 1 上、下级湖缓坡、逆坡输水水面线计算结果定性分析

Table 1 Qualitative analysis of water surface lines

of the gentle and inverse slopes during the process of water transfer in the upper and lower lakes

湖泊	流向	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	出湖口水位/m	南阳(南)或微山岛水位/m	入湖口水位/m	水面线类别	水面线特征
上级湖	北向南天然流向	100	32.8	32.99	33.32	缓坡 A ₁	与平均底坡平行或上凹
	南向北调水流向	100	32.8	33.44/33.39	33.51	逆坡 B	上凸
下级湖	北向南天然流向	125	31.3	31.33	31.57	缓坡 A ₁	与平均底坡平行或上凹
	南向北调水流向	125	31.3	31.52/31.47	31.54	逆坡 B	上凸

注：“/”下的数据为一维总流计算法的计算结果。

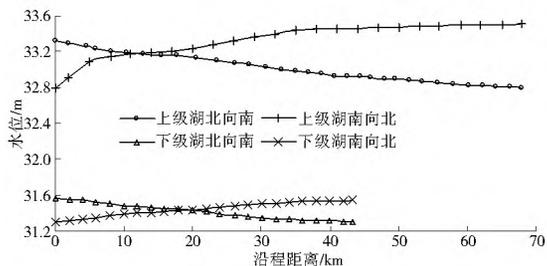


图 3 上、下级湖缓坡、逆坡输水水面线

Fig. 3 Water surface lines of the gentle and inverse slopes during the process of water transfer in the upper and lower lakes

线的定性分析结论,与明渠恒定非均匀渐变流的逐段试算法(一维总流计算法)的计算结果基本吻合¹。两者计算结果出现差异的主要原因是二维数学模拟方法比一维总流计算法能更好的反映湖区断面滩槽变化、植被覆盖以及行洪道开挖等实地情况对输水流域和水面线的影响,一维总流计算法的线性平滑处理分段计算长度为 1 km,难以真实的反映南四湖错综复杂的地形特征变化。

4 最佳开挖疏浚方案与流场分析

4.1 调水设计方案与模拟条件

南水北调东线一期工程南四湖上、下级湖不同站址调水流量和控制点水位方案分别见表 2 和表 3,南四湖流域在调水期实行中水截蓄导用后河流入湖流量占调水流量的比例较小,因此不予考虑¹¹。

表 2 南四湖不同站址调水流量方案

Table 2 Flow rate schemes of water transfer at different sites of Nansi Lake

设计方案	下级湖调入			下级湖调出/	上级湖调出
	韩庄老运河口	郑集河口	合计	上级湖调入	
正常设计	125	75	200	125	100
特殊干旱	80	0	80	80	70

表 3 南四湖不同站址调水控制点水位方案

Table 3 Water level schemes of water transfer at different control sites of Nansi Lake

设计方案	下级湖		上级湖	
	二级坝泵站引水渠口 桩号 105+000	微山岛/ 000	上级湖出口	南阳(南)/ 桩号 34+000
正常设计	31.3*	≤31.7	32.8*	≤33.3
特殊干旱	31.0	≤31.3	32.5	≤32.8

注: * 表示南四湖上、下级湖的死水位。

由表 2 可以看出,下级湖调水入流边界为湖区东南的韩庄老运河口、西南的郑集河口,正常设计方案由两站共同承担调水任务,特殊干旱设计方案仅由韩庄老运河一站承担调水任务。下级湖调水出流边界为二级坝泵站引水渠口,调水进、出水流量差为江苏用水和下级湖调蓄量;上级湖调水入流边界为二级坝泵站,调水出流边界为梁济运河口,调水进、出水流量差为山东用水和上级湖调蓄量。由表 3 可以看出,下级湖调水出流边界二级坝泵站引水渠口正常设计和特殊干旱设计方案的控制水位分别为 31.3 m、31.0 m,对应微山岛的控制水位分别不大于 31.7 m、31.3 m;上级湖调水出流边界梁济运河口正常设计和特殊干旱设计方案的控制水位分别为 32.8 m、32.5 m,对应南阳(南)的控制水位分别不大于 33.3 m、32.8 m。

南四湖输水航道开挖疏浚是选择湖内输水深槽与原三级航道的结合方案,按三级航道标准加宽进行开挖疏浚方案的优化模拟与计算,原底宽 50 m,最小通航水深 3 m,边坡系数=1:5 的梯形断面,设计航道底高程:上级湖为 29.3 m,下级湖为 27.8 m。

4.2 最佳开挖疏浚方案确定

首先,按照南水北调东线一期工程南四湖上、下级湖不同站址调水流量方案和出湖口控制点水位条件,在现状地形情况下采用作者创建的南四湖深度平均平面二维水流数学模型体系,分别进行正常设计和特殊干旱设计方案上、下级湖输水二维流场的数值模拟。根据模型输出结果分别绘制上级湖和下级湖在现状地形情况下的输水水面线,见图 4(a)和图 4(b)。

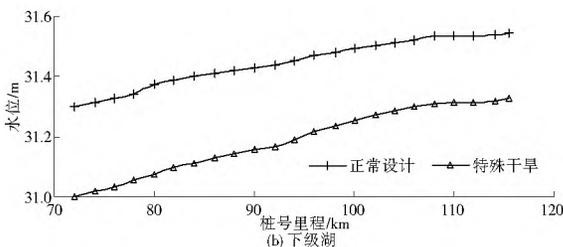
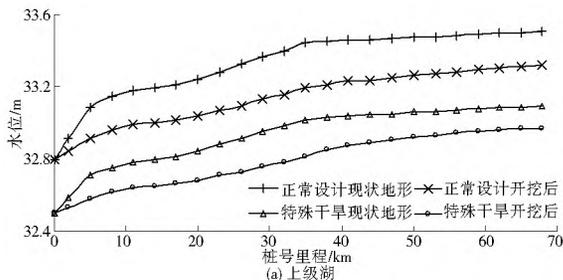


图 4 南四湖各设计方案输水水面线

Fig. 4 Water surface lines of Nansi Lake under different design schemes during the process of water transfer

由图 4(a) 可以看出, 上级湖在现状地形情况下正常设计和特殊干旱设计方案的南阳(南)水位分别为 33.44 m、33.01 m, 均不满足表 3 中南阳(南)水位分别不大于 33.3 m、32.8 m 的控制水位要求。因此, 上级湖需要进行输水航道的开挖疏浚。由图 4(b) 可以看出, 在现状地形情况下下级湖正常设计和特殊干旱设计方案的微山岛水位分别为 31.52 m、31.29 m, 均满足表 3 中微山岛水位分别不大于 31.7 m、31.3 m 的控制水位要求。因此, 下级湖不需要进行输水航道的开挖疏浚。

其次, 根据上级湖在现状地形情况下正常设计和特殊干旱设计方案的流场和输水水面线模拟结果, 分析得到上级湖水流收缩和输水水面线形成壅水阻水的湖段为桩号 0+000(梁济运河口)至 36+000(建闸村)之间的 36 km。该湖段位于南四湖回水变动区泥沙淤积的库尾段, 在调水后反向输水时出现壅水阻水现象, 需要开挖河床进行泥沙疏浚。对上级湖壅水阻水的湖段 0+000 至 36+000 沿湖内原三级主航道进行输水深槽的开挖疏浚, 逐步加宽输水航道底宽, 按边坡系数 = 1:5 调整上级湖模型系统中的输水航道及两侧地形高程。

第三, 按照南四湖上级湖不同站址调水流量方案和出湖口控制点水位条件, 在输水航道不同开挖疏浚地形情况下采用南四湖深度平均平面二维水流数学模型体系, 分别进行正常设计和特殊干旱设计方案的上级湖输水二维流场的数值模拟试算。最后, 确定同时满足正常设计和特殊干旱设计方案的最佳开挖位置为 0+000 至 36+000 湖段的湖内主航道、长度 36 km 和底宽 68 m, 即输水航道底宽比原三级航道底宽增加 18 m。根据上级湖在最佳开挖疏浚方案下的模型输出结果绘制输水水面线。由图 4(a) 可以看出, 上级湖在最佳开挖疏浚方案下正常设计和特殊干旱设计方案的南阳(南)水位分别为 33.18 m、32.80 m, 均满足表 3 中南阳(南)水位分别不大于 33.3 m、32.8 m 的控制水位要求。该开挖疏浚方案在上级湖输水通过正常设计流量时南阳(南)的水位略低于控制水位要求, 而在上级湖输水通过特殊干旱设计流量时南阳(南)的水位正好等于控制水位要求, 因此, 该方案是能同时满足正常设计和特殊干旱设计方案控制点水位要求的最小规模开挖疏浚方案。

资料¹ 给出一维总流计算法的上级湖最佳开挖位置为 0+000 至 34+000 湖段的湖内主航道、长度 34 km 和底宽 68 m, 比南四湖深度平均平面二维水流数学模型的优化模拟结果其开挖疏浚长度短 2 km, 该方案在上级湖南阳(南)以南的水面线出现急增情况, 即形成壅水阻水的不合理现象。

4.3 湖内输水流场分析

根据上级湖在最佳开挖疏浚方案下调水正常设计方案的模型输出结果绘制输水流场, 见图 5(a); 根据下级湖在现状地形情况下调水正常设计方案的模型输出结果绘制输水流场, 见图 5(b)。

由图 5 可以看出, 南四湖上、下级湖正常设计方案输水流场的分布特征为: 全湖区在输水水位差的作用下呈现由南向北流场方向的单一性特点, 无明显的漩涡回流区产生; 主航道流速远高于非主航道区, 特别是下级湖东股航道流速较

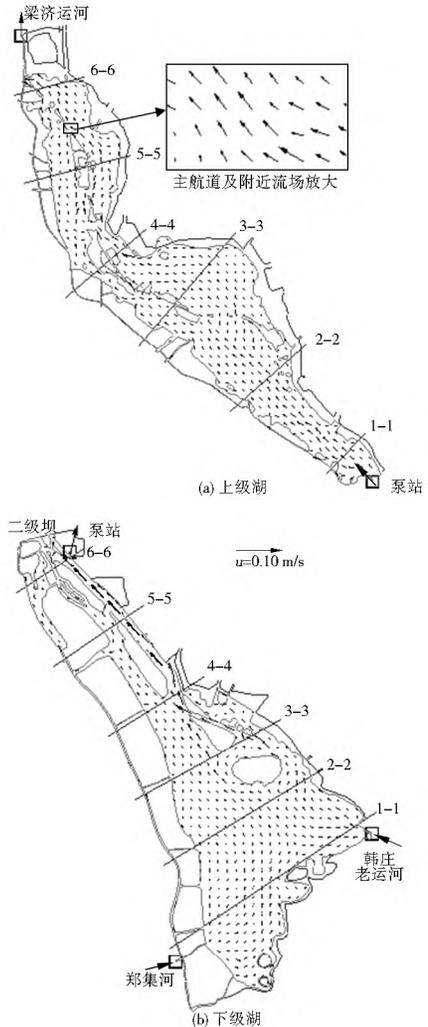


图 5 南四湖正常设计方案输水流场

Fig. 5 Flow field of Nansi Lake under the normal design scheme of water transfer

高, 二级坝下行洪道由于在设计水位(低水位)输水时, 其贯通性差流速很低; 由于流速显示的间距较大, 上级湖输水主航道的较高流速未显示出来, 由图 5(a) 中局部放大部分可以看出主航道流速也较高。在独山湖湾内流速接近于零, 由于糙率对水流速度的影响较大, 因此芦苇覆盖区的流速相对于其它湖区更低, 甚至出现滞流区。

模拟结果表明: 上级湖正常设计主航道流速范围 0.003~0.302 m/s, 平均流速为 0.121 m/s, 特殊干旱主航道流速范围 0.002~0.260 m/s, 平均流速为 0.105 m/s; 下级湖正常设计主航道流速范围 0.021~0.267 m/s, 平均流速为 0.134 m/s, 特殊干旱主航道流速范围 0.017~0.187 m/s, 平均流速为 0.102 m/s; 非主航道区芦苇、湖草丛生, 鱼塘、台田圈屿, 沟渠纵横交错南北贯通性极差, 流速范围一般低于主航道流速一个数量级左右。南四湖特殊干旱设计方案输水流场的分布特征分析略列。

南四湖正常设计和特殊干旱设计方案条件下, 上、下级湖各特征断面输水区宽度及主航道流量比例分布情况分别见图 6(a) 和图 6(b)。

由图 6 可以看出, 南四湖上、下级湖正常设计与特殊干旱设计方案的输水区宽度都非常接近, 各湖区在正常设计比

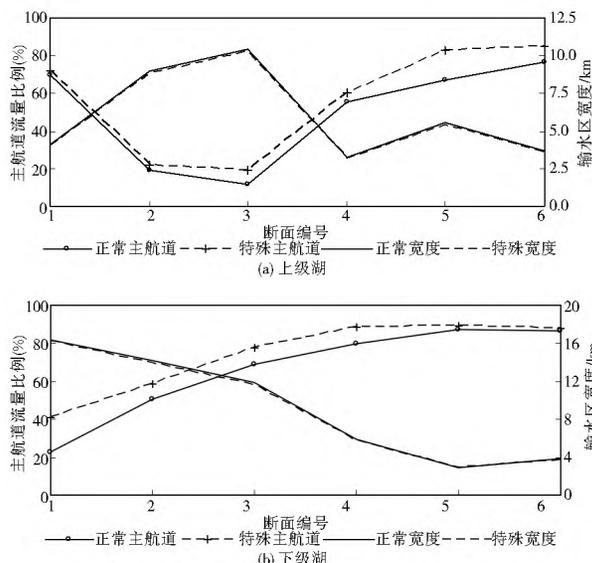


图6 南四湖各设计方案输水区宽度及主航道流量比例分布
Fig.6 Width of water transfer area and flow rate ratio distribution of main channel under different design schemes of Nansi Lake

特殊干旱时的输水水位稍高,输水区宽度也略大,各湖区的输水区宽度沿流程自南向北随湖泊平面形态而变化。上级湖在二级坝上F1断面的宽度为4.1 km,在独山湖33断面最宽为10.5 km,在南阳岛44断面收缩宽度为3.2 km,在南阳湖中段55断面为5.5 km,在洧府河口外66断面为3.7 km,之后输水区宽度急剧收缩流出上级湖进入梁济运河。下级湖输水区宽度沿流程自南向北呈现减小趋势,在微山湖南端F1断面的宽度最大为16.3 km,在新薛河口以南的宽度变化较大,在新薛河口外44断面的宽度为5.8 km,之后,直到二级坝下输水区的宽度为3~4 km。

从图6还可以看出,南四湖上、下级湖在正常设计比特殊干旱时的输水水位稍高,普遍存在在非主航道区输水的流量比例略有上升,在正常设计比特殊干旱时输水的主航道流量比例要小,各湖区输水的主航道流量比例分布沿流程自南向北随湖泊的断面形态而变化。以正常设计方案为例,上级湖自二级坝泵站至22断面输水主航道流量逐渐减小,该流段水深较大,湖内输水区宽度逐渐扩大,再加上主航道由西向东摆动,使输水易于横向散开,到达22断面时输水主航道流量占总流量的19.2%;流经独山湖宽阔湖段的33断面时输水主航道流量最小占总流量的11.9%。之后,输水流经南阳岛收缩段再进入南阳湖库尾段,输水主航道的流量比例急剧增大,即由44断面的55.3%到66断面的76.5%。下级湖的宽阔湖段和深水区同处于微山岛南段,在微山岛北段湖面变窄、水深变浅,在下级湖北段(昭阳湖二级坝下段)则处于下级湖的库尾段,主要依靠东股航道输水。因此,下级湖自南向北沿流程输水主航道流量比例为逐渐单调增加趋势。正常设计调水由韩庄老运河和不牢河蔺家坝闸以北约8 km处的郑集河口分东、西两站进水,在微山湖南端F1断面时输水主航道流量占总流量的22.6%,在新薛河口外44断面输水开始进入东股航道流量占到79.4%,在二级坝泵站引水渠口66断面输水东股航道流量占到86.2%。

综上,南水北调东线工程南四湖上、下级湖的湖内主航道承担着主要输水功能。

5 结论

借助于SMS地表水模拟系统,以南四湖万分之一地形图(CAD版)和卫星遥感影像资料为基础,创建了南四湖深度平均平面二维水流数学模型体系,并完成了对模型的验证,并得出以下结论。

(1)在南水北调东线一期工程南四湖设计方案条件下,开展了上、下级湖二维流场的数值模拟试算,确定了同时满足正常设计和特殊干旱运行控制点水位要求的最小规模开挖疏浚方案。上级湖的最佳开挖位置为梁济运河口沿湖内主航道由北向南至南阳岛南建闸村,开挖长度36 km、底宽68 m、底高程29.3 m和边坡系数=1:5;下级湖不需要进行输水航道的开挖疏浚。

(2)输水流场分析表明,南四湖设计方案中上、下级湖全湖区在输水水位差的作用下呈现由南向北流场方向具有单一性特点,无明显的漩涡回流区产生;主航道平均流速为0.12 m/s,最大流速为0.30 m/s,一般高于非主航道区一个数量级左右。

(3)南四湖设计方案6个断面的输水区宽度范围2.80~16.31 km,平均值为7.49 km;南四湖输水主航道平均流量比例为61.5%,最大可承担88.9%,说明南四湖湖内主航道承担着主要输水功能。

参考文献(References):

- [1] 武周虎,罗辉,刘长余,等.南水北调东线南四湖出、入湖泵站开启时间差分析研究[J].南水北调与水利科技,2008,6(1):77-80,91.(WU Zhou hu, LU O Hui, LIU Chang yu, et al. Start Up Time Difference of Pumping Station of Nansi Lake in The South to North Water Transfers [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 77-80, 91. (in Chinese))
- [2] 武周虎,慕金波,谢刚,等.南四湖及入出湖河流水环境质量变化趋势分析[J].环境科学研究,2010,23(9):1167-1173.(WU Zhou hu, MU Jin bo, XIE Gang, et al. Analysis of Water Environmental Quality Variation Trends in Nansi Lake and its Joined Rivers [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(9): 1167-1173. (in Chinese))
- [3] 赵培青,武瑞锁,王俊杰,胡方.南水北调东线南四湖~东平湖段输水结合航运梯级方案研究[J].水利规划与设计,2007,(2):7-9.(ZHAO Pei qing, WU Rui suo, WANG Jun jie, et al. Study on Cascade Development Scheme for Water Transfer and Navigation from Nansihu to Dongpinghu of the East Route of South to North Water Transfer Project [J]. Water Resources Planning And Design, 2007, (2): 7-9. (in Chinese))
- [4] 赵培青,王俊杰,胡方.南水北调东线一期工程南四湖~东平湖段输水结合航运方案比选[J].南水北调与水利科技,2008,6(1):250-252.(ZHAO Pei qing, WANG Jun jie, HU Fang. Schemes Comparison of the Section of the Nansi Lake Dongping Lake in the Phase I of Eastern Route Project of the South to North Water Diversion [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 250-252. (in

- Chinese)
- [5] 高峰,赵培青,刘景华,王翊人.南水北调南四湖水位分析[J].中国农村水利水电,2005,(8):36-37.(GAO Feng,ZHAO Peiqing,LIU Jinghua,et al.Water Level Analysis of The South to North Water Diversion Project in Nansi Lake [J].China Rural Water and Hydropower,2005,(8):36-37.(in Chinese))
- [6] 马生伟,蔡启铭.浅水湖泊风生流的迎风有限元数值模型研究[J].水科学进展,2000,11(1):70-75.(MA Shengwei,CAI Qiming.Study on Upwinding Finite Element Numerical Model for Wind Driven Current in Shallow Lakes[J].Advances in Water Science,2000,11(1):70-75.(in Chinese))
- [7] 张萍峰,景韶光,黄凤岗.滇池二维浅水湖泊风生流模型研究及结果显示[J].系统仿真学报,2002,14(5):554-556.(ZHANG Pingfeng,JING Shaoguang,HUANG Fenggang.Research on Two Dimensional Wind driven Currents Modeling on Shallow Water in Dianchi Lake and Related Result Display[J].Journal of System Simulation,2002,14(5):554-556.(in Chinese))
- [8] 武周虎,姜雅萍.南水北调东线调水期南四湖流场数值模拟[A].黄真理.中国环境水力学2002[C].北京:中国水利水电出版社,2002,39-44.(WU Zhouhu,JIANG Yaping.Numeric simulation of Nansihu Lake flow during Eastern Route of South to North Water Transfer Project Running [A].HUNANG Zhenli.China Environmental Hydraulics 2002[C].Beijing:China WaterPower Press,2002,39-44.(in Chinese))
- [9] 骆辉煌,李翀,蒋艳,等.南四湖风生流数值模拟研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(3):133-137,141.(LUO Huihuang,LI Chong,JIANG Yan,et al.Numerical Simulation for Wind Driven Current in Nansihu Lake[J].South to North Water Diversion and Water Science & Technology,2011,9(3):133-137,141.(in Chinese))
- [10] US Army, Engineer Research and Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory, Users to Guide to RMA2 WES Version 4.5.
- [11] 李玉凤,王波,李小明.基于SPOTS影像的山东南四湖地被覆盖分类研究[J].遥感技术与应用,2008,23(1):62-66.(LI Yufeng,WANG Bo,LI Xiaoming.The Land Cover Classification and Characteristics of Nansihu Lake Based on SPOT5 Remote Sensing Image[J].Remote Sensing Technology and Application,2008,23(1):62-66.(in Chinese))
- [12] 何国峰.风对南四湖调水水流水质的影响研究及其应急对策[D].青岛:青岛理工大学,2009.(HE Guofeng.The Study of the Influence of the Wind to the Water Current and Quality of Nansi Lake and Emergency Countermeasure of Nansi Lake [D].Qingdao:Qingdao Technological University,2009.(in Chinese))
- [13] 陈春燕,汤子扬,张丽萍.SMS软件RMA2模块固边界的处理研究[J].水电能源科学,2008,26(5):68-70.(CHEN Chunyan,TANG Ziyang,ZHANG Liping.Research on Internal Boundary Condition in RMA2 Module of SMS Software[J].Water Resources and Power,2008,26(5):68-70.(in Chinese))
- [14] 程海云,葛守西,李玉荣.水动力模型实时校正方法研究[J].人民长江,2005,36(2):6-8.(CHENG Haiyun,GE Shouxi,LI Yurong.Research on Real-time Rectifying Method of Hydrodynamic Model[J].Yangtze River.2005,36(2):6-8.(in Chinese))
- [15] 王开,魏加华,王光谦.大型渠道糙率系数设计取值的不确定性影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(6):872-876.(WANG Kai,WEI Jiahua,WANG Guangqian.Uncertainty in Design Value of Roughness Coefficient for Large Scale Channel and Effects Analysis[J].Journal of Basic Science and Engineering.2008,16(6):872-876.(in Chinese))

《南水北调与水利科技》优先数字出版声明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年起,将《南水北调与水利科技》印刷版期刊出版的定稿论文在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《南水北调与水利科技》编辑部