

基于GPS的洪泽湖水流流场质点示踪及数值模拟

陈钢¹, 翟月², 王旭丹³, 王淳¹, 茅志兵¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京慧水软件科技有限公司,
江苏 南京 210019; 3. 天津市水文水资源管理中心, 天津 300061)

摘要: 针对不同水文气象条件下湖泊真实流场描述的难题, 通过在洪泽湖主要入口分别投放GPS示踪器, 实现了对湖泊表层水流轨迹、方向的实时监测, 形成洪泽湖初步流场图。野外示踪实验结果表明: 流经湖泊中心区域的水流运动轨迹均为自西向东的曲线; 入湖流量较小时水流难以进入湖泊中心流场, 入湖流量较大时流速空间分布不均, 流场较复杂; 小流量入湖条件下水流运动受到湖泊表面风场的影响, 流量较大时水流流动的主要影响因素为湖泊自身的流场。同时, 构建了不同入湖流量条件下的洪泽湖二维水动力数值模型, 水动力模型模拟的流场分布基本符合水流质点GPS示踪实验的结果, 两者拟合较好。本次研究揭示了洪泽湖的真实流场, 基于GPS的示踪方法可用于分析河流湖泊的水动力空间变化, 为泥沙、污染物质的输移和扩散提供了重要参考依据。

关键词: 水流流场; GPS示踪实验; 水动力模型; 洪泽湖

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0142-07

Particle tracing and numerical simulation of flow field in Hongze Lake based on GPS tracer experiment

CHEN Gang¹, ZHAI Yue², WANG Xudan³, WANG Chun¹, MAO Zhibing¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Huishui Software technology Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 3. Tianjin Hydrology and Water Resources Management Center, Tianjin 300061, China)

Abstract: To describe the real flow field of the Hongze Lake under different hydrologic and weather condition, GPS tracers were installed at the main entrances of the lake to visualize the real-time tracking of water surface trajectory and flow direction, and the preliminary flow field map of the Hongze Lake was formed. The field tracer experiments show that the water flow path in the center of the lake is a curve from west to east. When the inflow is small, it is difficult for water to enter the central flow field of the lake. When the inflow is large, the spatial distribution of flow velocity is uneven and the flow field is complex. It is also found that the water flow is affected by the surface wind field of the lake under the condition of small flow rate, whereas the main influencing factor of water flow is its own flow field when the flow rate is large. At the same time, a two-dimensional hydrodynamic model was built to simulate the flow field of Hongze Lake under different inflow conditions. The simulation result shows that the simulated flow field is basically consistent with the result of the GPS tracer experiment. GPS based tracking experiment method is applicable to the analysis of the spatial variation of hydrodynamic forces in rivers and lakes, it can also provide some insights for the transport and diffusion of sediment and pollutants.

Key words: flow field; GPS tracer experiment; hydrodynamic model; the Hongze Lake

收稿日期: 2020-09-28; 修回日期: 2021-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407900); 国家自然科学基金项目(41901020); 中央高校自由探索专项(B200202030)

作者简介: 陈钢(1986-), 男, 江苏海安人, 博士, 副教授, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 王旭丹(1986-), 女, 浙江宁波人, 硕士, 工程师, 研究方向为水环境监测。

1 研究背景

湖泊作为静止水体具有保水、蓄水、清洁和供水的基本能力,是水文和生物地球化学水循环的重要组成部分,并影响着生态和经济等许多方面^[1-2]。然而,众所周知,大型湖泊总是存在不同程度的水环境问题,比如富营养化严重、有机污染加剧、生物多样性遭到破坏等^[3-5]。湖泊内水、沙及各种营养物质和污染物主要来源于流域,湖泊水流运动路径是各种入湖物质输移的主要途径与方式,并在湖内发生物理、化学和生物等一系列复杂反应,进而给湖泊水质的时空变化带来严重的影响^[6]。

洪泽湖是我国第四大淡水湖,是淮河流域的最大调蓄湖泊及其下游地区重要的水源地,同时也是南水北调东线工程的过水通道,在防洪保安、城乡供水、交通运输以及维系生态平衡等方面有不可替代的作用^[7-8]。但是,洪泽湖由于受粗放式发展模式的影响,生态环境退化问题愈发严重^[9-10]。淮河上游及洪泽湖周边城市排放的工业污染物、生活污染物,洪泽湖区域内畜禽养殖与水产养殖过程中污染物直接入湖,不仅影响了洪泽湖综合功能的发挥,还使湖体健康受到严重威胁^[11-15]。因此近年来,洪泽湖的健康和可持续发展问题引起了全社会的高度关注。水流流场与水质场的模拟是揭示湖水水流水质主要影响因素的有效工具,对湖泊的治理起重要作用^[6]。尽管基于水动力学模型探究表层水流运动特性和空间分布特征的研究取得了一定进展,不少学者依据鄱阳湖等湖体构建了二维水动力数学模型来模拟风场条件下的水流时空结构^[16-22],但对于湖泊系统、从入湖口涌入湖区的水在空间尺度上的运动路径缺少实际验证。目前,只有李云良等^[18]在鄱阳湖进行了野外粒子示踪实验,但由于投放粒子数量较少及监测时间较短,未能完全反映出湖泊整体的流场轨迹。

本文与先前研究的不同之处在于,基于GPS示踪实验和二维水动力模型,通过将野外实地监测与水流数值模拟相结合,深入探究了洪泽湖主要出入口及气象条件影响下的流场过程。本文在洪泽湖主要入湖口分别投放GPS示踪器,通过GPRS/CDMA网络实时传输,实现对表层水流轨迹、方向的实时跟踪,最终形成完整的洪泽湖初步流场图,同时构建二维水动力模型模拟验证基于GPS示踪器的流场的准确性。本文所进行的研究有利于正确认识湖泊上游来水的迁移路径、空间分布特征和湖区外来污染

物的可能运动路径,为进一步深入研究洪泽湖水动力水质特征提供前提条件,为改善湖区生态健康提供可靠的科学依据,这些正是目前洪泽湖研究中极为重要又缺乏的方面。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

洪泽湖位于江苏省西北部,淮安、宿迁两市境内,湖面辽阔,资源丰富,素有“日出斗金”的美誉,是淮河流域最大的湖泊型水库,地处苏北平原中部偏西,位于淮河中下游结合部^[14]。湖泊最大长度约60.0 km,平均宽度约24.4 km,底部为浅碟型,总体呈西北高、东南低趋势。洪泽湖承泄淮水上中游 $15.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的来水^[11],入湖河流主要在湖西侧,主要有淮河、怀洪新河、池河、新汴河、老汴河、新(老)濉河等,其中淮河入湖水量占总入湖水量的70%以上。洪泽湖出湖主要包括淮河入江水道、入海水道、淮沐新河和苏北灌溉总渠,大部分的洪水由三河闸下泄入江水道后流入长江。洪泽湖是淮河流域最大的湖泊,由于湖面宽阔,在风场和上游入流的作用下,产生环流,对湖水流动有较大的影响,产生水面倾斜,影响大堤防洪安全和闸门的泄水流量。

本文的具体研究区域为洪泽湖湖区,其周边水系及主要出入口示意图如图1所示。洪泽湖主要的入湖口有:淮河干流的蚌埠站、怀洪新河的峰山站、濉河的泗洪站、新汴河的团结闸等;主要的出流口有:三河闸、二河闸、高良涧进水闸、高良涧水电站等。这些出、入口都是基本的水文站,具有完整的水文资料,为水动力学模型的模拟计算提供了可靠的边界条件。

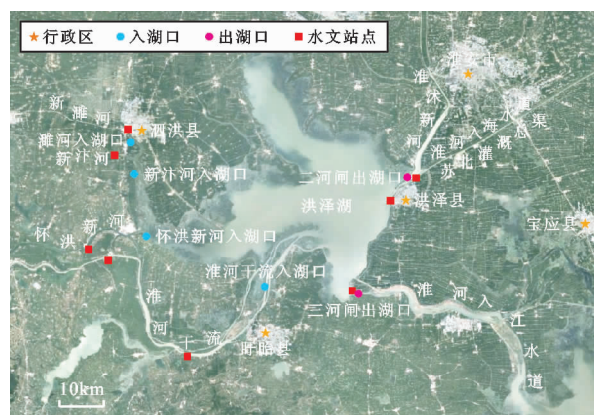


图1 洪泽湖周边水系及主要出入口示意图

2.2 GPS野外示踪实验

GPS以全天候、高精度、自动化、高效益等优点

赢得广大测绘工作者的信赖,并成功应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、资源勘察、地球动力学等多个学科与领域。GPS 的定位是通过围绕地球运转的人造卫星连续向地球表面发射连续波无线电信号,卫星导航接收机通过接受卫星发出的无线电信号,用导航算法解算得到定位仪器的位置^[23]。本次示踪实验投放的 GPS 定位仪器由蓄电池、GPS 用户接收机、天线等组成,可以每隔 10 min 向终端接收设备发送实时坐标。

野外实验前对淮河干流的蚌埠站、怀洪新河的峰山站、安河的金锁镇、濉河的泗洪站、新汴河的团结闸 5 大主要入口处及实际地形进行实地考察,最终选定 4 个主要入湖口处(图 1)投放示踪器,同一入口的示踪器分为一组。为全面深入探究洪泽湖水体运动规律,针对不同入湖水文条件分别投放 GPS 示踪器。通过获取 GPS 示踪器标点的精确信息,结合可视化技术解析 4 组 GPS 示踪器在不同入湖水文条件下的实验结果,获得不同入口示踪器的真实运动轨迹,从而形成不同环境下的洪泽湖初步流场图。

2.3 二维水动力模型构建

水动力数学模型是将水动力学问题用数学方程进行描述^[24],并在一定定解条件下求解,从而模拟实际的水流状态^[25-26]。目前数值模拟方法主要有:有限差分法(finite difference method, FDM)、有限体积法(finite volume method, FVM)和有限单元法(finite element method, FEM)。本文洪泽湖水动力模型采用二维浅水波方程来描述,洪泽湖是典型的二维区域,湖面宽阔,蓄水面积 1 500 km²,因此必须考虑风应力和柯氏力的影响,采用完全的二维模型模拟,并用破开算子法分裂二维浅水波方程^[27],然后利用 FDM 方法求解:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = q \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial vU}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} = -g \frac{|V|}{c^2 h^2} U + fV + \frac{1}{\rho} \tau_{ux} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial uV}{\partial x} + \frac{\partial vV}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} = -g \frac{|V|}{c^2 h^2} V + fU + \frac{1}{\rho} \tau_{vy} \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为水位, m; u 、 v 分别为 x 与 y 方向上的流速, m/s; U 、 V 分别为 x 与 y 方向上的单宽流量, m²/s; V 为单宽流量的矢量, $|V|$ 为它的模, $|V| = \sqrt{U^2 + V^2}$, m²/s; q 为考虑降雨等因素的源项, m/s; g 为重力加速度, m/s²; C 为谢才系数, m^{0.5}/s; f 为柯氏力系数, 1/s; τ_{ux} 、 τ_{vy} 分别为风应力沿 x 和 y 方向

的分量, kg/(m·s²), 可采用如下公式计算:

$$\begin{cases} \tau_{ux} = \rho_a C_D |W| W_x \\ \tau_{vy} = \rho_a C_D |W| W_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_a 为空气密度, kg/m³; C_D 为阻力系数; W 为离水面 10 m 高处的风速矢量, m/s。

根据研究区域的资料情况,把流域概化为具体的数值计算模型。模型采用四边形网格(500 m × 500 m)来划分单元,共计划分为 6 174 个计算单元(图 2(a)),通过 DEM(digital elevation model)数据生成湖底地形(图 2(b))。本研究收集了 2018 年 7 月 1 日至 2019 年 10 月 1 日的洪泽湖出入湖流量水位及洪泽湖附近气象资料,设置模型的入湖流量边界为泗洪(老)、泗洪(濉)、双沟(合)、小柳巷、盱眙(图 2(a)),设置出湖的水位或流量边界为二河闸、高良涧闸、三河闸(图 2(a))。气象站资料采用距离三河闸 2 km 的蒋坝站(图 2(a)),通过微型综合自动气象站连续监测降水、蒸发、风速、风向、气温等水文气象要素。根据湖泊水文资料设置的洪泽湖出入流边界条件信息如表 1。

表 1 模型边界设置情况

序号	名称	类型
1	泗洪(老)流量	入流边界
2	泗洪(濉)流量	入流边界
3	双沟(合)流量	入流边界
4	小柳巷流量	入流边界
5	盱眙流量	入流边界
6	二河闸水位	出流边界
7	高良涧闸水位	出流边界
8	三河闸水位	出流边界
9	蒋坝风速	气象条件

3 结果与分析

3.1 野外示踪实验结果与分析

本研究在 2019 年 1 月 16 日、2019 年 6 月 23 日与 2019 年 8 月 18 日分 3 次投放示踪器,每次投放 4 组,每组投放 5 个示踪器。根据各组示踪器发送的位置信息解析 4 组 GPS 示踪器不同水文条件下的实验结果,观察时长共计约 30 d。

通过对 2019 年 1–9 月洪泽湖流量边界的分析(图 3)得出,洪泽湖主要的入流为盱眙和小柳巷,因此可视为控制条件。2019 年 1 月 16 日第 1 次投放后的 30 d,小柳巷与盱眙的平均入流量分别为 312

m^3/s 和 $815 \text{ m}^3/\text{s}$; 2019 年 6 月 23 日第 2 次投放后的 30 d, 小柳巷与盱眙的平均入流量分别为 $560 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1150 \text{ m}^3/\text{s}$; 2019 年 8 月 18 日第 3 次投放后的 30 d, 小柳巷与盱眙的平均入流量分别为 131

m^3/s 和 $580 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此在本研究中, 通过这 3 次投放周期的平均流量比较, 假定第 1 次投放为中流量入湖时期, 第 2 次投放为大流量入湖时期, 第 3 次投放为小流量入湖时期。

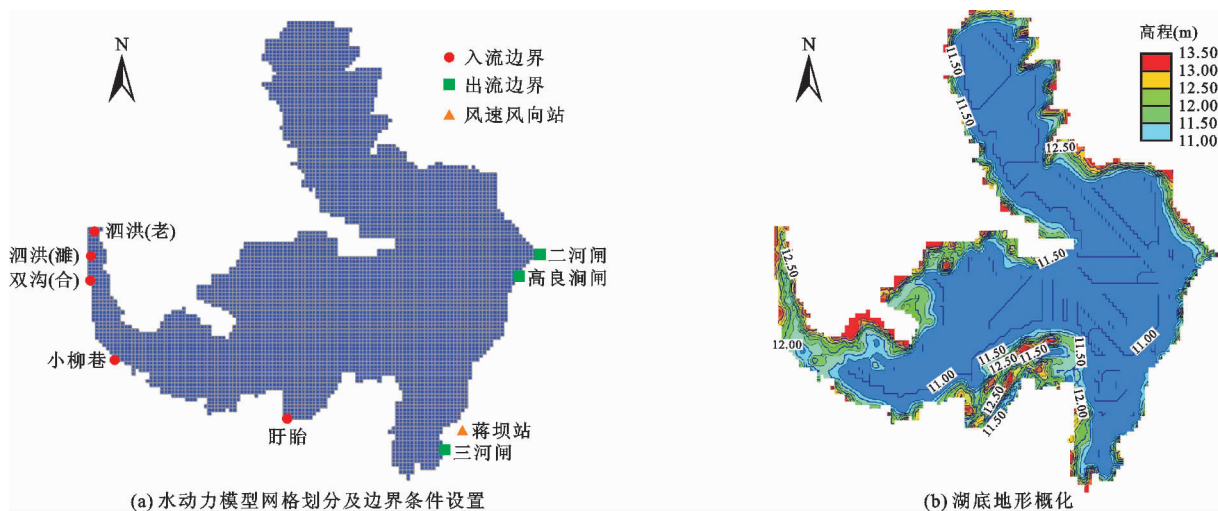


图2 洪泽湖水动力模型设置及湖底地形概化图

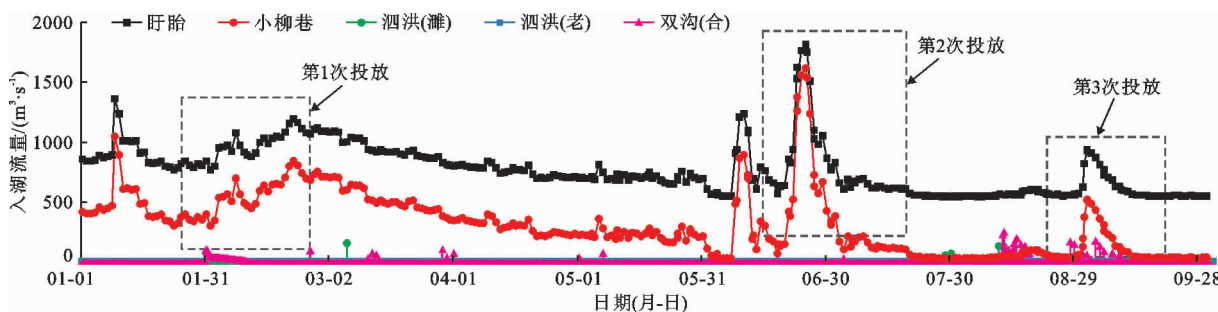


图3 2019 年洪泽湖入湖流量及示踪器投放时间

3.1.1 第1次投放后水流轨迹解析 2019 年 1 月 16 日进行示踪实验的第一次投放, 图 4 展示了中流量入湖条件下示踪实验仪器自投放后 5、10、20 及 30 d 的轨迹, 其中各示踪器运动轨迹使用蓝色线条绘出, 当日示踪器具体位置使用红点标明。第 1 组的示踪器在为期 30 d 的示踪过程中没有发生位置的变动, 即湖泊西北凹岸处入流的水流处于静止状态, 没有向湖泊中心运动。第 2 组的示踪器轨迹显示, 自湖泊西北部入流的水流首先向南运动, 10 d 后到达双沟镇附近并转为向东运动, 20 d 后到达临淮镇, 此后水流向东北运动, 在投放 30 d 后到达龙集镇南部附近, 整体运动较为缓慢, 预计此后水流向东运动。第 3 组的示踪器运动轨迹显示, 自湖泊西南部双沟镇附近入流的水向东北方向运动, 5 d 后到达临淮镇附近, 并在投放后 20 d 到达湖泊中心, 30 d 后从湖泊东部出流口的二河闸流出, 运动轨迹受湖泊北岸岸线形状的影响, 呈现

为向北凸出的曲线。第 4 组示踪仪器的轨迹则表明湖泊南部入流口的水流向东北流动, 此后在湖泊南部凸岸处变为东向运动, 其迹线随时间推移而愈发分散, 在投放后 20 d 已有水流自湖泊东南部出口的三河闸流出, 此时水流在湖泊东南岸的东双沟镇附近分为两部分, 小股水流向西北方向运动, 在 30 d 后从东部二河闸流出, 水流主体向南流动, 在 30 d 后全部从湖泊东南部的三河闸出湖。

3.1.2 第2次投放后水流轨迹解析 2019 年 6 月 23 日进行了第 2 次投放, 图 5 展示了大流量入湖条件下示踪实验仪器自投放后 5、10、20 及 30 d 的轨迹, 其中各示踪器运动轨迹使用黑色线条绘出, 当日示踪器具体位置使用红点标明。由编号为第 1 组的示踪器轨迹可得, 自湖泊西北凹岸处入流的水流缓慢地向南运动, 相比中流量入湖条件的迹线水流状态由静止变为运动, 可以推断大流量条件下, 湖泊西

北部的局部流速比中流量条件的流速更大。第2组示踪器30 d的轨迹显示自湖泊西北部入流的水流向南运动,相比中流量条件下的轨迹基本相似却略显动力不足。7月22日,即运动30 d后仅到达临淮镇,预计此后水流继续向东运动。结合第1组的轨迹可以推断,湖泊西北部的局部流场较为复杂,流速的分布与中流量条件下的情况相差较大。第3组的示踪器轨迹则可以看出,自西南部双沟镇附近入流的水向东运动,此后迹线向北凸的程度明显降低,而更趋近于横跨湖泊中心的直线,10 d后到达湖泊中心区域,在投放后20 d从湖泊东部出流口的二河闸流出。第4组示踪仪器的轨迹则表明湖泊南部入流的水流向东北方向流动,在投放后5 d即到达中流量条件下该组仪器投放20 d后到达的位置,并已发生水流分向,分为西北向流动的水流主体与南向流动的小股水流,西北流向的水流在投放后10 d即到达湖泊东部出流口的二河闸,向南流的小股水流也在10 d后从湖泊东南部的三河闸出湖,其运动轨迹相比第1种流量条件更为分散且弯曲程度更大。

根据与图5呈现的中流量入湖条件下水流运动轨迹的比较可以发现,大流量条件下湖泊西北部的局部水流运动更为复杂,而南部水流运动明显加快,整体水流从入流到达湖泊出流口的时间明显缩短;另一方面,整体的水流运动轨迹与中流量条件下的水流轨迹相比有一定程度的改变。自湖泊西北部入流的水流流动轨迹基本与中流量条件一致;自西南部入流的水在横跨湖泊中心区域后,迹线向北凸的程度明显降低,而更趋近于横跨湖泊中心的直线;湖泊南部入流水流的迹线更为分散,主体水流由向南运动变为向北运动。

3.1.3 第3次投放后水流轨迹解析 2019年8月18日进行第3次投放,图6显示了该小流量入湖情况下,示踪实验仪器自投放后5、10、20及30 d的轨迹,其中各示踪器运动轨迹使用橙色线条绘出,当日示踪器具体位置使用红点标明。第1组示踪器在静止了10 d后开始向南运动,30 d后的运动距离相比大流量条件稍短。第2组示踪器的运动轨迹与前述两种流量条件下的轨迹相似,30 d后到达的位置则在湖泊北岸的半城镇附近,处于相同时间中流量与大流量条件下到达的位置之间,预计此后将继续向东运动。第3组投放的示踪器轨迹则显示,自湖泊西南岸双沟镇附近入流的水向东流动,10 d后到达临淮镇附近并变为向东北流动,在20 d到达龙集镇附近的湖泊中心后继续向东运动,此后运动轨迹为

向北凸出的曲线,30 d后到达湖泊东岸的出流口二河闸,运动轨迹与第1种流量条件下的运动轨迹一致。第4组示踪仪器的轨迹表明湖泊南部入流口的水流向东北运动,8月27日到达老子山镇的东北侧附近并改变流向为向东流,此后与前两种流量条件不同,没有发生水流分向现象,到达东双沟镇附近后向南运动,在30 d后自湖泊东南部出口的三河闸流出,其余示踪器受动力不足的影响部分在入流口附近搁浅,或仅到达老子山镇北侧附近的位置。

根据第1~3组的示踪器轨迹,可以看出湖泊中心流速较大,而洪泽湖南部绕盱眙县北部一段的流速较前两种流量条件明显降低。小流量条件下水流运动会受到湖泊表面风场的一定影响,洪泽湖南部的水流在9月6日后持续受到北风的影响,向南的水流运动轨迹不再是曲线而是接近直线。

3.1.4 3次示踪实验综合分析 与中、大两种不同流量入湖条件下的水流轨迹进行比较,小流量入湖条件下湖泊西北部的水流运动情况十分复杂,流速时空差异较大,而南部的水流运动则随着流量变小明显变得迟缓;另一方面,整体的水流运动轨迹与中流量入湖条件下的水流轨迹更为相似。

总结上述推断可以发现,流经湖泊中心区域的水流运动轨迹均为自西向东的曲线,均从二河闸流出,即湖泊主要的水流运动是自西向东,主要出口是二河闸。而自湖泊西北角以及南岸入湖的水受到流量条件的影响,流量较小时水流难以进入湖泊的中心流场,因而流动缓慢或处于静止状态;流量较大时流速空间分布不均,流场较复杂。例如南岸入流的水流有两个出流点,流量大时受湖泊主流向东运动的影响,发生水流分向,流量越大,参与湖泊水体整体向东运动的水越多,在示踪实验结果中体现为监测到从二河闸流出的示踪器数量越多,从三河闸流出的示踪器数量越少;流量越小时,水流受湖泊南岸附近局部流场的影响越大,水流流动缓慢或停滞,仅小股从湖泊东南岸的三河闸流出。这也与三河闸不常开启,湖泊水流较少从该处流出的现象相符合。

此外,小流量条件下水流运动会受到湖泊表面风场的一定影响,例如洪泽湖南部的水流在9月6日后持续受到北风的影响,向南的水流运动轨迹不再是曲线而是接近直线。而流量较大时水流流动的主要影响因素是湖泊自身的流场,湖泊表面风场的作用较小。

3.2 水动力模拟结果分析

采用二维水动力模型模拟洪泽湖二维水流动

态。该模型使用 2018 年 7 月 1 日至 2019 年 10 月 1 日出海口二河闸、三河闸的水位与流量资料进行率定与验证。站点拟合的确定性系数可达 0.91,相对误差均在 8% 以内,表明模型能够很好地模拟洪泽湖内水位的时空变化(图 7)。图 7(b)显示了 2019 年 7 月 2 日洪泽湖表面的二维流速场,其中代表流速的箭头长度越大表示流速的数值越大。由图 7

(b)可以明显看出,湖泊的西部(靠近湖泊西部入口口的临淮镇)、湖泊南岸、湖泊东南部入江水道及东部二河闸两个出口处的流速较大,其中湖泊东南部的二河闸的流速最大,这与二河闸作为洪泽湖的主要出流点的实际情况吻合。湖泊中心区域流速较大,整体呈现自西向东的流动特征,也与前述示踪实验的结果基本一致。

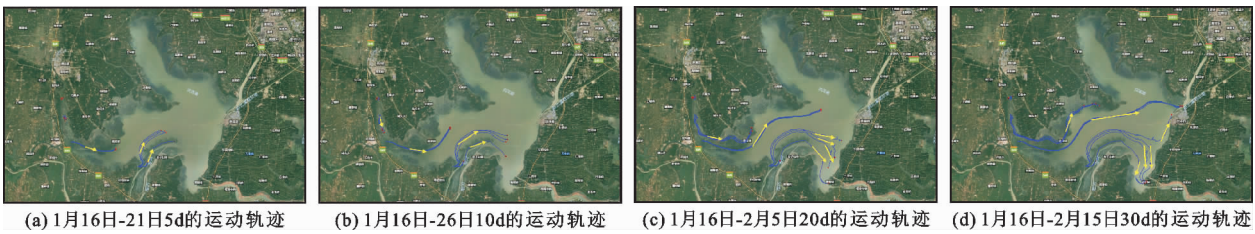


图 4 示踪实验仪器第 1 次投放后的运动轨迹

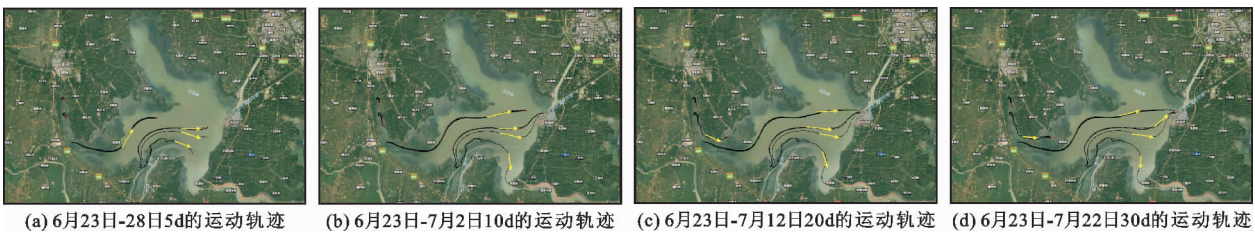


图 5 示踪实验仪器第 2 次投放后的运动轨迹图

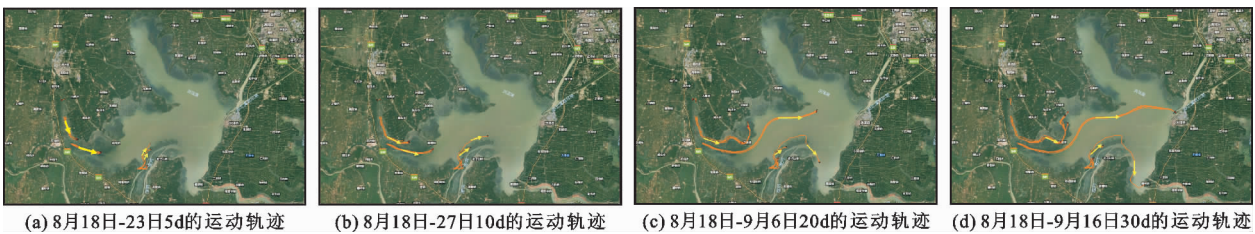


图 6 示踪实验仪器第 3 次投放后 5d、10d、20d 及 30d 运动轨迹图

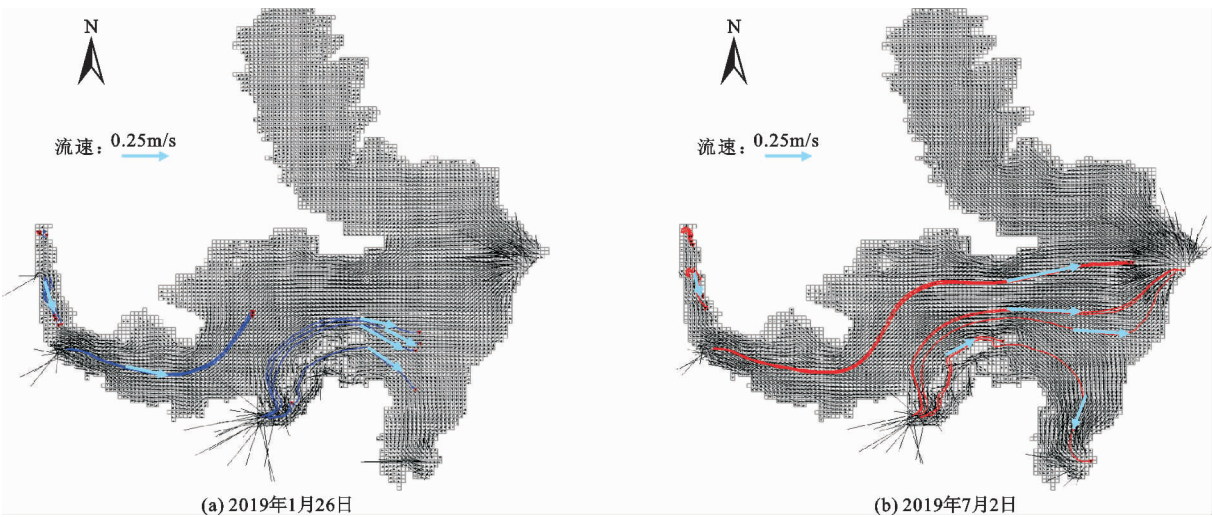


图 7 洪泽湖流速场模拟结果与示踪迹线叠加

为综合本研究质点示踪实验与水动力模拟这两种研究手段的优点,并更直观地展示洪泽湖水流动

场的特性,将上述中、大两种流量条件下示踪器实验投放 10 d 后的结果与水动力模型模拟的当日流场分别叠加,得到图 7(a)、7(b)所示的结果。

由图 7 可见,中流量入湖条件下,湖泊南岸流速较大,因此南岸入流的水流开始时主要是向北运动,随后受到湖泊中心流场的影响而转为向东流动,唯有一股水流由于靠南岸较近,未参与中心流场的水流运动,短暂地向东流动后迅速在老子山镇附近转为向南流动。而湖泊西北角的狭长水域,水流流速差异较大但总体较小,因此同属于西北岸入流,虽然入流点位置不同的水流其运动轨迹相似,但运动距离不同。湖泊西岸临淮镇附近水流流速大,是湖泊主体水流向东运动的起点,从此处入流的水运动速度快,并且流经湖泊中心区域直接到达湖泊东岸的二河闸出口。

大流量入湖条件下,中心流场的范围扩大,流速整体增大,这体现在示踪实验中即湖泊各处入流的水流运动均明显加快,除小股水流受南岸局部复杂流场影响最终从三河闸流出外,参与湖泊主体向东流动的水流在 10 d 内全部到达二河闸出口,湖泊西北部的的水流运动也有整体加速的趋势。

小流量入湖条件下,中心流场范围缩小,整体流速降低明显,西北部流速空间分布不均,而湖泊南岸附近流速明显变小。示踪实验中自西北部不同地点入流的两股水流运动轨迹完全不同,一股水流静止而另一股水流运动速度较快,正是水动力模拟结果西北部流场复杂情况的体现。而湖泊南岸由于流速明显变小,示踪实验中水流运动明显变缓,相比前述的两种流量条件,其运动轨迹更靠近南岸,因此受南岸局部流场的影响较大。

综合上述 3 种情况可以看出,不同流量大小的入湖条件下,湖泊主体水流向东流动的速度随之变化,流场范围也与流量大小呈现正相关关系。除此之外,湖泊西北部的狭长区域与湖泊南岸附近的流场较为复杂,局部流速时空差异较大,与示踪实验所示的水流轨迹较为混乱的特征基本符合。水动力模型模拟结果的流场基本符合水流质点 GPS 示踪实验的结果,两者拟合较好,模拟较为可信。

4 结论与讨论

为探究洪泽湖水流运动及其具体流场分布,本文分别进行了以 GPS 为基础的水流轨迹示踪实验与二维水流数值模拟,主要结论如下:

(1) 示踪实验中,流经湖泊中心区域的水流运

动轨迹均为自西向东的曲线,均从二河闸流出,可以推断,湖泊主要的水流运动是自西向东,主要出口是二河闸。湖泊西北角以及南岸入流的水受到流量条件的影响,流量较小时水流难以进入湖泊的中心流场;流量较大时流速空间分布不均,流场较复杂。南岸入流的水流有两个出流点,流量大时受湖泊主流向东运动的影响,发生水流分向,流量越大,参与湖泊水体整体向东运动的水越多;流量较小时,水流受湖泊南岸附近局部流场的影响越大,水流流动缓慢或停滞,仅小股从湖泊东南岸的三河闸流出。此外,小流量条件下湖泊整体水流运动会受到湖泊表面风场的影响,而流量较大时水流流动的主要影响因素是湖泊自身的流场,湖泊表面风场的作用较小。

(2) 将不同流量条件下的示踪实验结果与水动力模型模拟结果相叠加,不同流量条件下,湖泊主体水流的向东流动速度随之变化,中心流场范围也与流量大小呈现正相关关系。除此之外,湖泊西北部的狭长区域与湖泊南岸附近的流场较为复杂,局部流速时空差异较大,与示踪实验所示的水流轨迹较为混乱的特征基本符合。水动力模型模拟结果的流场基本符合水流质点 GPS 示踪实验的结果,两者拟合较好,数值模拟较为可信。

参考文献:

- [1] 宋晓薇,赵倡璇,谢祎敏,等. 湖泊生态系统服务功能价值估算及保护对策研究[J]. 环境科学与管理,2019,44(1):162-166.
 - [2] 于水,陈迪桃,黄法融,等. 中亚农业水资源脆弱性空间格局及分区研究[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(4):11-20.
 - [3] 刘玉栋,熊丽黎,陈斯芝,等. 鄱阳湖区城市湖泊水质变化趋势研究——以南昌市青山湖为例[J]. 江西水利科技,2020,46(3):230-234.
 - [4] 蒋笑影,夏霆,潘新星,等. 苏州湖泊水源地水质时空变异特征[J]. 中国农村水利水电,2020(9):190-195+201.
 - [5] 王书航,郑朔方,尚晓,等. 平原河网景观湖泊水质提升关键问题分析与对策研究——以嘉兴南湖为例[J]. 环境工程技术学报,2020,10(6):891-896.
 - [6] 季振刚. 水动力学和水质:河流,湖泊及河口数值模拟[M]. 李建平,冯立成,赵万星,译. 北京:海洋出版社,2012.
 - [7] 梁云,殷峻暹,祝雪萍,等. MIKE21 水动力学模型在洪泽湖水位模拟中的应用[J]. 水电能源科学,2013,31(1):135-137+99.
 - [8] 王苓如,薛联青,王思琪,等. 气候变化条件下洪泽湖以上流域水资源演变趋势[J]. 水资源保护,2015,31(3):57-62.
- (下转第 155 页)

- cal cell motions in a small ice-covered meander river reach[J]. *River Research and Applications*, 2011, 27(9): 1118–1125.
- [19] DEMERS S, BUFFIN – BELANGER T, ROY A G. Macroturbulent coherent structures in an ice-covered river flow using a pulse-coherent acoustic Doppler profiler[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(9): 937–946.
- [20] LOTSARI E, KASVI E, KAMARI M, et al. The effects of ice cover on flow characteristics in a subarctic meandering river[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2016, 42(8): 1195–1212.
- [21] WANG Jun, CHEN Pangpang, SUI Jueyi. Progress in studies on ice accumulation in river bends[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(6): 737–744.
- [22] 张宝森. 定点式全天候凌情动态数据采集技术及装备[J]. *人民黄河*, 2021, 43(1): 2.
- [23] 中华人民共和国水利部. 河流冰情观测规范: SL 59—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [24] MICHEL B, MARCOTTE N, FONSECA F, et al. Formation of border ice in the St. Anne River[C] // *Proceedings of the Workshop on Hydraulics of Ice-covered Rivers*. Edmonton, Canada, 1980.
- [25] 罗红春, 冀鸿兰, 郜国明, 等. 黄河什四份子弯道冰期水流及冰塞特征研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1089–1100.
- [26] 王卫红, 李舒瑶, 张晓华. 黄河下游游荡性河段主流线调整与水沙关系研究[J]. *泥沙研究*, 2006, 31(6): 37–43.

(上接第148页)

- [9] 闵毅松, 刘轶琨. 洪泽湖水污染事故起因与防范探讨[J]. *污染防治技术*, 2003(1): 57–59.
- [10] 郝达平. 洪泽湖水环境现状评价及水污染分析[J]. *江苏水利*, 2005(11): 32–34.
- [11] 叶春, 李春华, 王博, 等. 洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(5): 725–730.
- [12] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于PCA和SOM网络的洪泽湖水质时空变化特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(12): 1593–1601.
- [13] 崔彩霞, 花卫华, 袁广旺, 等. 洪泽湖水质现状评价与趋势分析[J]. *中国资源综合利用*, 2013, 31(10): 44–47.
- [14] 王霞, 沈红军, 刘雷, 等. 洪泽湖水质特征分析及评价[J]. *环境与发展*, 2019, 31(9): 11–13+15.
- [15] 徐亚东, 毛晓文. 洪泽湖北部主要入湖河道阵发性水质污染原因分析及预防措施[J]. *江苏水利*, 2020(11): 4–8.
- [16] YE Xuchun, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494: 83–95.
- [17] 罗全胜, 许新勇. 黄河内蒙河段水流数值模拟研究[J]. *水利水运工程学报*, 2014(5): 95–99.
- [18] 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 鄱阳湖水流运动与污染物迁移路径的粒子示踪研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(11): 1748–1758.
- [19] 徐乐, 牧振伟, 李园园, 等. 基于CCHE的塔什米里克引水枢纽二维水流数值模拟[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(2): 83–89.
- [20] 许泽星, 郑媛予, 关见朝, 等. 岷江都江堰河段交汇区水流运动特性数值模拟[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(3): 59–66.
- [21] 郝敏霞. 黄河宁夏四排口河段防洪工程丁坝附近流场的数值模拟研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [22] 刘鑫, 李春光, 兰斌, 等. 基于MIKE3的黄河宁夏四排口河段水动力模拟[J]. *人民珠江*, 2020, 41(7): 33–38.
- [23] 王飞, 王冬梅, 谢义林, 等. 基于GPS的湖泊巡查GIS研究[J]. *微型机与应用*, 2012, 31(14): 51–53+57.
- [24] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [25] 张书农, 华国祥. 河流动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [26] HE Cheng, DROPPA I. Numerical modeling of fine particle plume transport in a large lake[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, 37(3): 411–425.
- [27] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.