

# 基于拉格朗日方法的洪泽湖与巢湖河流出入湖水体追踪计算\*

彭兆亮<sup>1</sup> 陈昌仁<sup>2</sup> 万骏<sup>2</sup> 吴晓兵<sup>2</sup> 张怡辉<sup>1</sup> 胡维平<sup>1</sup> 崔健<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室 南京 210008;

2. 江苏省洪泽湖水利工程管理处 淮安 223100)

**摘要** 利用耦合北斗和 GPS 双定位系统的拉格朗日随体法水质点追踪仪, 在 2018 年 9 月至 2019 年 10 月期间开展了总数为 18 次的洪泽湖和巢湖主要河流河水入湖后表层、中层和底层水体运移同步追踪观测, 研究了两个湖泊河水入湖后的运移轨迹和速度特征。结果表明: 淮河主河道河水入洪泽湖后流向南北两侧; 徐洪河河口处水体表层流速在洪泽湖 5 条河道出入湖口处为最大; 巢湖双桥河河口处水体流速受巢湖闸运行影响强烈, 各层流速在 7 条入湖河流中最大。洪泽湖、巢湖入湖水体流速由表层至底层逐渐降低, 洪泽湖各层水体流速大于巢湖。洪泽湖河口处表层水体 8 次测量平均流速为 6.11cm/s; 巢湖为 5.51cm/s; 二者中层流速分别为 5.32 和 3.85cm/s; 底层则分别为 4.96 和 3.67cm/s。

**关键词** 拉格朗日; 质点追踪; 洪泽湖; 巢湖; 流速

**中图分类号** P343.3, TV131.2

doi: 10.11693/hyhz20200200040

河流作为湖泊流域人类活动和自然变化与湖泊生态系统之间进行物质和能量交换的纽带, 通过汇集流域地表径流及其携带的各类污染物质, 并将其输送到湖泊中, 已成为湖泊水质污染、富营养化和藻类水华等生态环境问题最大的驱动力(Kazi *et al.*, 2009; 蔡阳等, 2019; Peng *et al.*, 2019)。因此, 深入研究河水进入湖泊后的流动路径、速度及其影响范围, 对于加强水质污染和富营养化控制, 提升湖泊水资源与水环境保护水平, 促进湖泊生态环境恢复等都具有重要的理论指导意义。

追踪和观察流体运动轨迹的方式主要有欧拉方法和拉格朗日方法(Lai *et al.*, 2007)。拉格朗日方法的主要特征是将粒子作为离散相来分析处理, 注重描述粒子个体在空间中随时间的运动特征(Saidi *et al.*, 2014)。其目的是在复杂流态中找到或多或少的主要

结构, 进而模拟、追踪、记录和预测水体中水团的起源、历史和演化(刘晓辉等, 2015; Zhu *et al.*, 2020)。20 世纪 90 年代以来, 基于卫星定位的高精度、高分辨率拉格朗日追踪及数值模拟方法逐渐发展成熟, 并在河流、湖泊、河口和海洋等重要水体的流场形态和污染物扩散等水动力和水环境研究中得到了广泛的应用(Guha, 2008; Van Sebille *et al.*, 2018)。如 Du 等(2020)使用拉格朗日粒子跟踪和三维流体力学耦合模型, 研究了 2017 年哈维飓风导致的极端洪水携带的污染物进入美国加尔维斯顿海湾后的运移路径和滞留特征; 李子超等(2020)基于拉格朗日方法, 建立了山东海阳核电厂附近海域核素扩散模型, 分析了核电厂附近海域水动力特征和核素迁移路径; 陈毓敏等(2019)利用 ROMS 模式和拉格朗日方法, 研究了完整的黑潮运移路径及分布范围; 刘晓辉等(2015)利用

\* 江苏省洪泽湖水利工程管理处委托项目, HZH-JG-GL-060-2019 号; 安徽省巢湖管理局委托项目, 2017FFCZ4957 号; 国家自然科学基金项目, 41701567 号; 中国科学院“一三五”重大突破项目, NIGLAS2018GH02 号; 国家水体污染控制与治理科技重大专项, 2017ZX07603001 号。彭兆亮, 助理研究员, E-mail: zlpeng@niglas.ac.cn

通信作者: 陈昌仁, E-mail: 345885455@qq.com

收稿日期: 2020-02-13, 收修改稿日期: 2020-05-06

漂流浮标观测方法, 结合基于高分辨率数值模式的示踪粒子试验, 研究了黑潮在东海的运移路径及其季节变化规律; Xu 等(2020)比较了在相同控制条件下, 拉格朗日和欧拉方法对于预测湍流颗粒沉积的能力和异同点。上述研究充分说明了拉格朗日方法是对欧拉方法的有益补充, 有助于揭示不易从欧拉方法角度提取的水体和物质迁移扩散细节。

本文旨在利用具有自主知识产权的拉格朗日随体法水质点追踪仪, 观测和分析我国第四大和第五大淡水湖洪泽湖和巢湖各主要河流河水入湖后的运移路径和速度的时空变化特征。洪泽湖和巢湖同为我国重要的大型浅水湖泊, 在供水、洪水调蓄、运输、渔业和生态涵养等方面发挥重要作用, 但两个湖泊在出入湖水文和湖泊水动力条件方面存在较大差异。在全球气候变化和区域天气异常导致的极端事件发生频率有所增加的背景下, 研究结果对于科学解译河水水量和污染物入湖后对于不同水文水动力条件的浅水湖泊流场形态、水质时空变化及藻类水华迁移的影响规律, 揭示其水文和生态效应产生的动力学机制, 促进湖泊水环境治理、水动力和生态调控与改善, 以及科学应对区域气候变化导致的极端事件对湖泊水环境带来的负面影响等方面均具有重要的理论与实践意义。

## 1 研究区域概况

洪泽湖(图 1)位于江苏省中西部, 淮河中下游流

域, 是我国第四大淡水湖, 同时也是淮河防洪和南水北调东线工程重要的调蓄湖泊, 苏北地区重要的战略水源地, 在防洪、供水、灌溉、调水、渔业、运输以及生态等方面发挥着重要作用。洪泽湖为淮河过水湖泊, 水位和湖面面积变幅较大, 平均水深约 1.9m, 为典型浅水湖泊。洪泽湖多年平均气温为 19.9°C, 7 月平均气温最高, 为 27.8°C; 1 月平均气温最低, 为 1.6°C; 多年平均年降水量为 964.1mm。受季风影响, 雨季集中在 6—9 月, 降水量占全年 65.9%; 受北方寒冷气团的影响, 冬季降水量少, 占全年降水量的比例仅为 7%—8%。洪泽湖主要入湖河流有淮河、新汴河、淮洪新河、濉河、徐洪河、城子河等, 多分布于洪泽湖的西岸。主要出湖河道为三河、淮沭河和苏北灌溉总渠。

巢湖(图 1)位于安徽省中部, 合肥市境内, 是我国第五大淡水湖和巢湖市重要饮用水源地和合肥市备用水源地, 同时发挥防洪、航运、供水、灌溉、调水、渔业、生态和旅游等多重功能。巢湖多年平均水域面积 769.6km<sup>2</sup>, 平均水深约 2.7m, 蓄水量为 20.8 亿 m<sup>3</sup>。巢湖流域面积 13486km<sup>2</sup>, 其中巢湖闸上流域面积 9153km<sup>2</sup>, 属长江下游左岸水系。流域地势西高东低, 中间低洼平坦。巢湖流域支流众多, 主要入湖河流有: 杭埠河、派河、南淝河、白石天河、兆河、柘皋河、十五里河、双桥河等。其中杭埠河是入湖水量最大河流, 其次为南淝河和白石天河, 湖泊东部的裕溪河是巢湖湖水唯一出湖入江通道。

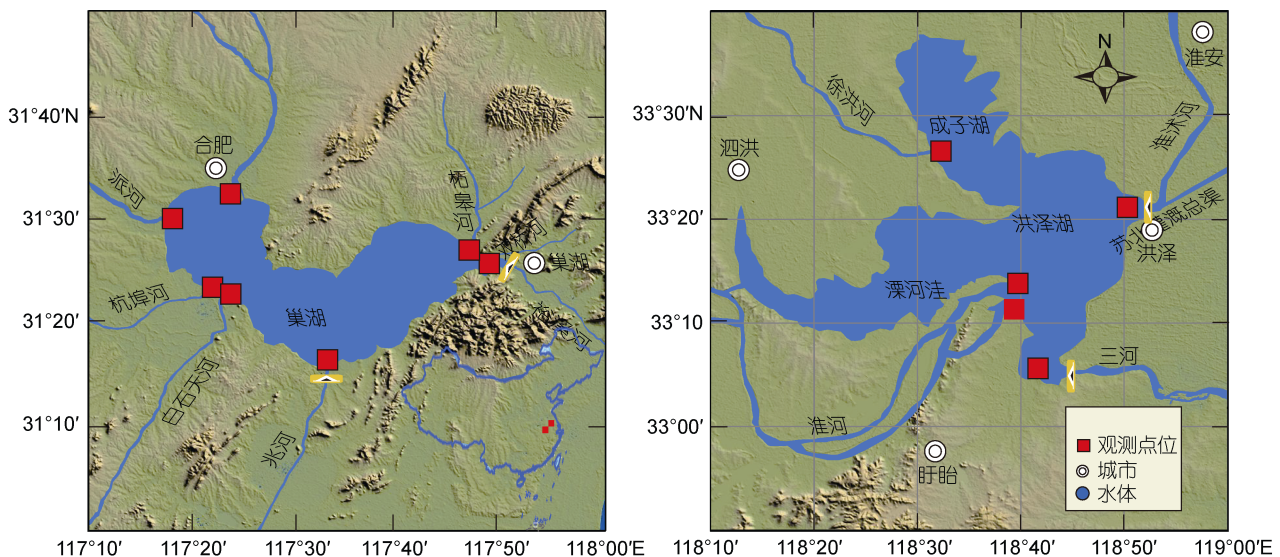


图 1 巢湖、洪泽湖河流入湖水体追踪仪器投放点位

Fig.1 The deployment of the Lagrangian water particle trackers in Chaohu Lake and Hongze Lake

## 2 研究方法

### 2.1 拉格朗日水质点追踪观测

**2.1.1 观测仪器** 利用中国科学院南京地理与湖泊研究所自主研发的拉格朗日随体法水质点追踪仪(专利号: 2011103895005), 在洪泽湖、巢湖各主要入湖河道河口处, 分表、中、底 3 层对水体入湖后的运动轨迹与速度开展追踪观测。

拉格朗日随体法水质点追踪仪由 2 个主要部件组成。仪器上部为一个类似于浮漂的小型卫星坐标信号收发装置(图 2a)。该装置内置集成芯片, 采用 GPS 和北斗双定位制式, 每隔 3s 接收并向服务器发送追踪仪的实时位置信息, 可以通过手机 APP 与电脑等

互联网终端实时在线查看。通过连续采集仪器 GPS 和北斗集成点位坐标信息, 可计算得到不同水层水体流动路径、速度和角度。该测量设备的设计与接收装置见图 2b。信号收发装置位于水面以上约 25cm 处, 通过一个直径约为 0.7cm 的碳纤维杆连接到位于水面以下的小浮球及锂电池仓。由于信号收发装置十分小巧, 因此湖面风场对仪器流动的影响可以忽略。仪器另外一个主要部件为十字形拉格朗日漂流架(图 2c), 该装置通过精确计算可下沉到水下不同深度, 可与水体同步流动(图 2d), 通过直径约为 1.5mm 的不锈钢绳索与水面处的信号收发装置相连, 因此可以追踪观测不同水层水体运动特征。

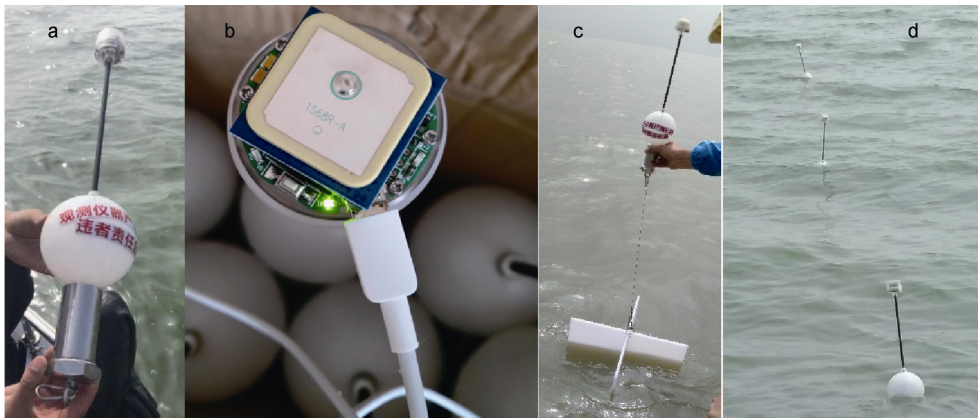


图 2 拉格朗日随体法水质点追踪仪

Fig.2 The Lagrangian water-particle tracing instrument

**2.1.2 观测方法** 洪泽湖和巢湖河流出入湖水体追踪观测开展于 2018 年 9 月—2019 年 10 月间, 观测覆盖了两个湖泊高水位、常水位和低水位不同水情。洪泽湖观测期间风速介于 0.73—2.86m/s 之间; 巢湖风速介于 0.66—4.58m/s 之间。具体观测时间、湖区水位和观测期间的风场情况如表 1 所示。表 1 中两个湖泊水位均为吴淞高程, 水位状态利用历史数据通过频率分析得到。洪泽湖河口水体流动追踪观测开展于 2019 年 3—10 月, 共开展了 8 次观测, 具体观测时间与观测时段洪泽湖水位状态如表 1 所示。拉格朗日水质点追踪仪初始投放点位共有 5 处, 分别为淮河南、北两个入湖区以及徐洪河、淮沭河和三河闸出入湖河口处, 具体投放点位如图 1 所示。

巢湖河口水体流动追踪开展于 2018 年 9 月—2019 年 7 月间, 共开展了 10 次观测; 仪器初始投放点位共有 7 处, 分别为双桥河、柘皋河、南淝河、派河、杭埠河、白石天河和兆河 7 条主要入湖河道河口处。

每次观测巢湖、洪泽湖各个河口及表、中、底不同水层同步开展, 每个河口各层同步观测时间保持在 3h 以上。表层仪器下面的漂流板投放至水面以下 20cm 处, 中层和底层分别投放于水下 70cm 和 120cm 处。2019 年 4 月之后由于洪泽湖和巢湖流域遭遇了近年来少见的极端枯水情势, 河道和湖区水位较低, 水深较浅, 底层仪器会遇到搁浅的情况, 为便于观测开展, 仪器的具体投放点位根据水深情况作出适当调整。

### 2.2 水体流动轨迹与速度计算

拉格朗日随体法水质点追踪仪的信号收发频率为 3s, 为去除湖面波浪等噪音信号对观测的影响, 首先将仪器记录的 3s 位置信息转化为每分钟平均坐标; 为便于分析和制图, 再根据分钟平均时段仪器经纬度坐标变化, 计算得到分层水体 10min 内沿经度和纬度方向的速度分量  $U$  和  $V$  的平均值。具体计算方法如图 3 所示。

表 1 洪泽湖与巢湖河流入湖水体追踪观测开展时间与湖区水位状态

Tab.1 Observation times and water level status of the water particle tracings in estuaries of Hongze and Chaohu Lakes

洪泽湖				巢湖			
日期(年/月/日)	水位(m)	水位状态	风场(m/s)	日期(年/月/日)	水位(m)	水位状态	风场(m/s)
2019/3/19	13.33	高水位	东南 1.48	2018/9/1	9.51	高水位	东南 1.42
2019/5/17	12.5	常水位	东北 2.86	2019/1/20	9.03	常水位	北 1.95
2019/5/19	12.47	常水位	西 1.93	2019/3/12	9.16	常水位	西 1.79
2019/8/14	12.09	常水位	北 1.55	2019/3/28	8.76	常水位	西北 4.58
2019/8/15	12.14	常水位	西北 0.73	2019/4/15	8.36	低水位	北 0.66
2019/9/10	12.38	常水位	东 1.31	2019/4/18	8.32	低水位	东北 2.29
2019/9/11	12.33	常水位	东 1.96	2019/4/25	8.31	低水位	西北 1.71
2019/10/27	11.73	低水位	南 1.20	2019/5/10	8.24	低水位	西南 0.96
				2019/6/6	8.48	低水位	东南 1.60
				2019/7/1	9.05	常水位	东北 1.77

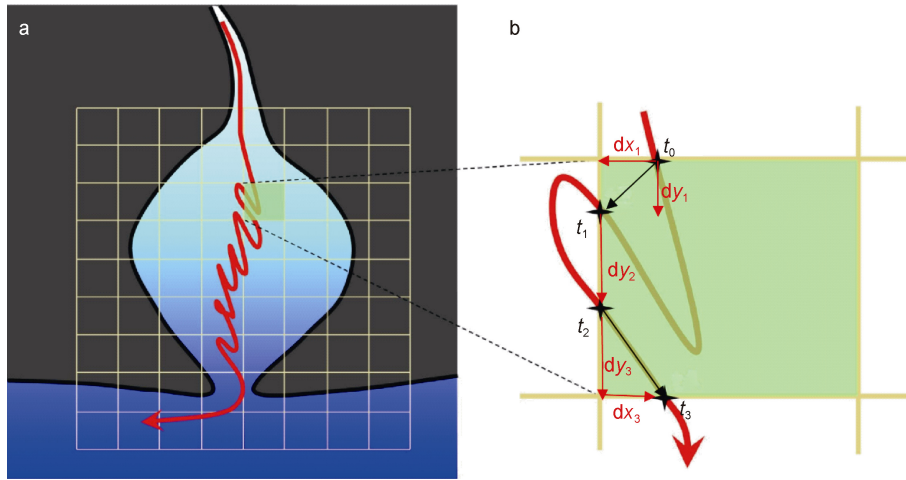


图 3 水体轨迹(a)与流速计算方法(b)示意图

Fig.3 Sketch diagram showing calculation methods of water pathway (a) and velocity (b) in estuary

注:  $t_0$  代表初始时刻仪器经纬度坐标,  $t_1, t_2$  和  $t_3$  代表不同时刻仪器坐标,  $dx$  和  $dy$  代表各时段内仪器沿经度和纬度方向位移, 其中  $dx_2$  为零在图中未显示

### 3 洪泽湖与巢湖河流出入湖水体流动轨迹追踪结果

#### 3.1 洪泽湖河流出入湖水体轨迹追踪

**3.1.1 水体流动轨迹** 洪泽湖淮河有南北两个入湖口, 其中北侧入湖口为主河道入湖口。上述淮河两个入湖口及三河、淮沭河和徐洪河 5 条主要河流河口处水体流动轨迹追踪结果如图 4 所示。图中从左到右各列分别显示表、中、底不同水层水体流动轨迹; 图中每一条点状线段代表不同测次轨迹, 蓝色圆点代表起点, 红色代表终点。

淮河为洪泽湖最大入湖河流, 多年平均入湖水量占洪泽湖入湖总水量的 70%以上。但由于 2019 年适逢枯水年份, 在 8 次观测中最大的入湖流量也仅有

511m<sup>3</sup>/s, 加之淮河在临近洪泽湖的入湖河段形成数条树状分支, 最主要的北侧分支河口开阔, 因此该流河水入湖后流速相比其他河流并不突出。从图 4 显示的河水入湖轨迹追踪结果来看, 淮河北侧入湖口处河水入湖后并未径直向湖心流动, 而是转向南北两侧。南侧入湖口河水入湖后轨迹与北侧有所区别, 先为向湖心方向流动, 后转向南侧。三河为洪泽湖最主要的出湖入江通道, 其流量受三河闸控制。但在 2019 年, 三河闸始终处于关闭状态, 因此闸门附近的水体并未如意想中的始终向东侧的三河闸方向流动, 在 8 次观测中有 3 次流向了南侧的高桥河。淮沭河为仅次于三河的洪泽湖湖水另一出湖通道, 出湖口处建有二河闸。在 8 次观测中, 淮沭河河口水体有 4 次为出湖, 4 次为入湖。徐洪河位于成子湖西岸, 在 8 次

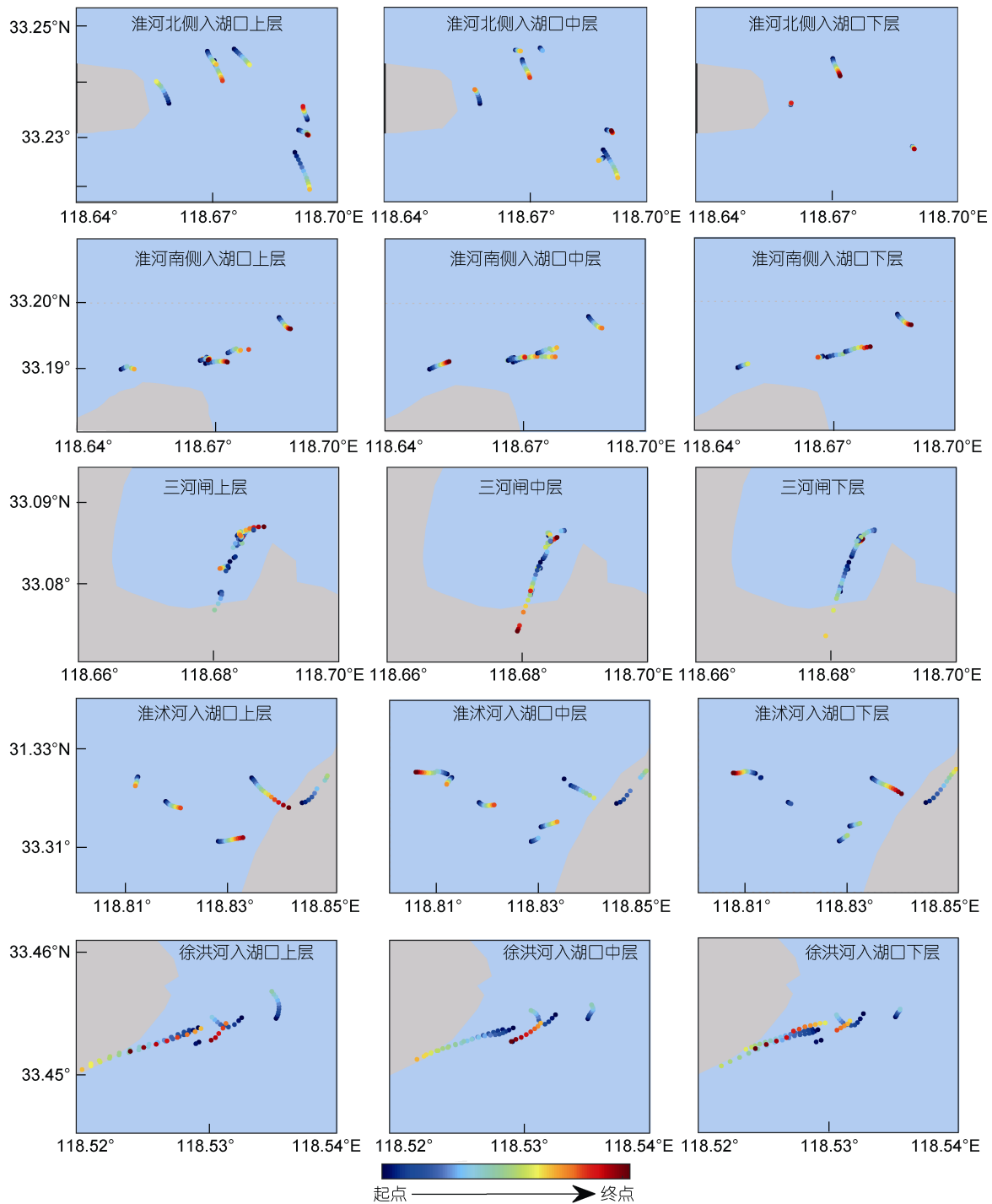


图 4 洪泽湖 5 条主要入湖河道水体入湖追踪结果

Fig.4 Water pathways of seven major estuaries of Hongze Lake

观测中发现有 5 次水体总体为入湖, 3 次为出湖。水体入湖后表、中、底分层水体流动方向总体一致, 为流向西北方向。

**3.1.2 水体流速** 计算了洪泽湖 5 条主要入湖河道不同日期水入湖后表、中、底层水体同步流动速

度和方向。由于篇幅限制, 本文仅给出其中主要入湖河流: 淮河、三河和淮沭河计算结果, 如图 5 所示, 图中的具体观测日期在子图下方显示。

从图中可以首先可以看出, 洪泽湖同一河口在同时段内表、中、底不同水层流速差别较大, 但多数

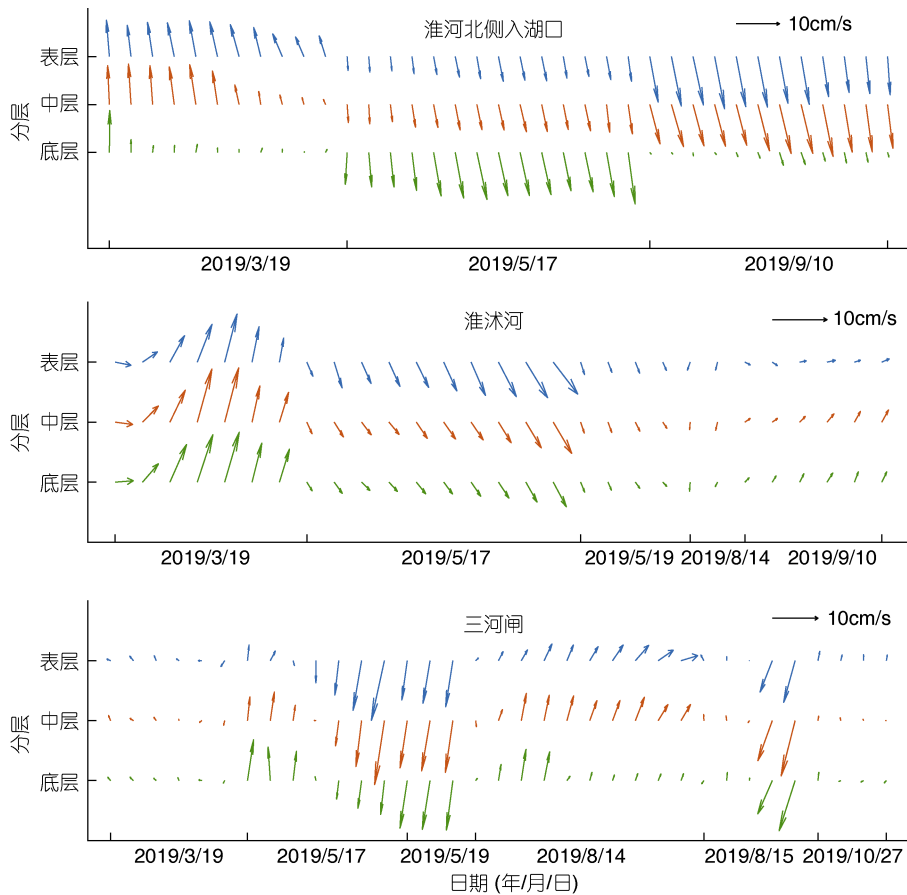


图 5 洪泽湖 3 条主要入湖河道分层水体流速时间序列

Fig.5 The time series of the water flowing velocity and direction at surface, middle, and bottom layers in three estuaries of Hongze Lake

注: 不同颜色箭头代表不同水层, 蓝色代表表层, 橙色代表中层, 绿色代表底层, 图 8 同

时段内流动方向较为相近, 并且流向的转变具有较好的同步性。

另外一方面, 洪泽湖各河流河口分层水体流动的速度和方向随时间变化幅度非常大, 甚至在同一测次都会出现急剧转向的情况。比如淮河北侧入湖口在 2019 年 3 月 19 日表、中、底三个不同水层流动方向都为北向转西北向, 且流速逐渐减慢; 但在 5 月 17 日流动方向保持在南向, 流速也呈逐渐加快的趋势。3 月 19 日和 5 月 17 日淮河南侧入湖口水体入湖后流动方向与北侧入湖口正相反。淮河水体主要出湖通道三河闸附近水体流速在所有 5 条出入湖河流中波动幅度最大, 比如在 3 月 19 日三个水层流速都不足 1cm/s, 而在 5 月 19 日则超过 10cm/s, 这可能与南部的高桥河取水灌溉, 导致河水逆流有关。淮沐河河口处水体流速受二河闸运行状态影响很大, 波动幅度也很大。相比其他出入湖河流徐洪河河口处水体流速相对平稳。

图 6 显示了洪泽湖 5 条出入湖河流河口处表、中、底层水体流动速度的同步观测结果。从图中可以看出, 洪泽湖各出入湖河流河口处水体总体呈现由表层到底层流速逐渐减慢的趋势, 这在淮河北侧入湖口和徐洪河体现的更加明显, 而淮河南侧入湖口各层流速的差异不是非常明显。

### 3.2 巢湖河流入湖水体轨迹追踪

3.2.1 水体流动轨迹 巢湖双桥河、柘皋河、南淝河、派河、杭埠河、白石天河和兆河 7 条主要河流入湖水体流动轨迹追踪结果如图 7 所示。从图中可以看出, 巢湖各主要河道入湖区水体受岸边形态、湖底地形、出入湖流量大小和湖面风场共同作用, 不同河道、不同水层在各个测次河水入湖后流动轨迹存在不同程度的差异。

双桥河入湖区由于是巢湖重要的避风港, 渔船众多, 为减小渔船对水体轨迹追踪的影响, 每次仪器投放在距离西部约 1km 处的开阔水域。由于双桥河

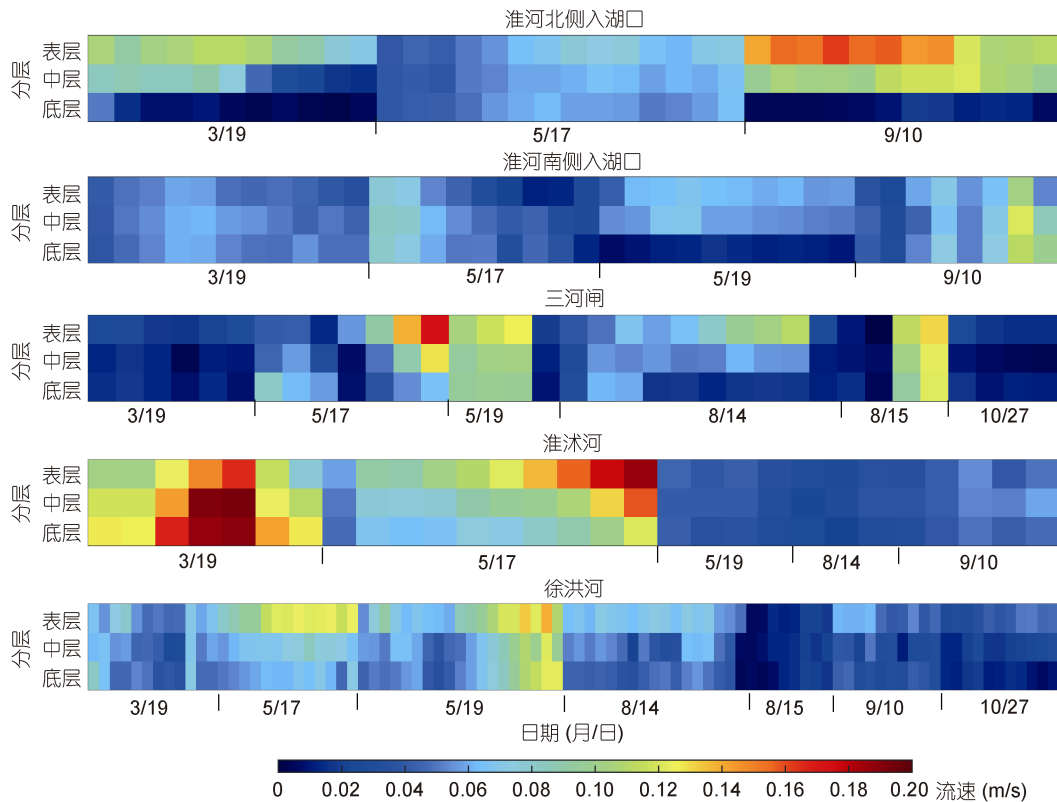


图 6 洪泽湖 5 条主要入湖河道分层水体流速

Fig.6 The concurrent flowing velocity of water in surface, middle, and bottom layers in 5 main estuaries of Hongze Lake

距离巢湖唯一出湖口门巢湖闸位置较近, 因此巢湖闸的运行状态对双桥河入湖河水流动轨迹影响较大, 但总体呈现由西向东的趋势, 因此从轨迹追踪结果可以判断, 双桥河污染负荷对其入湖区以西巢湖水体水质影响不大。

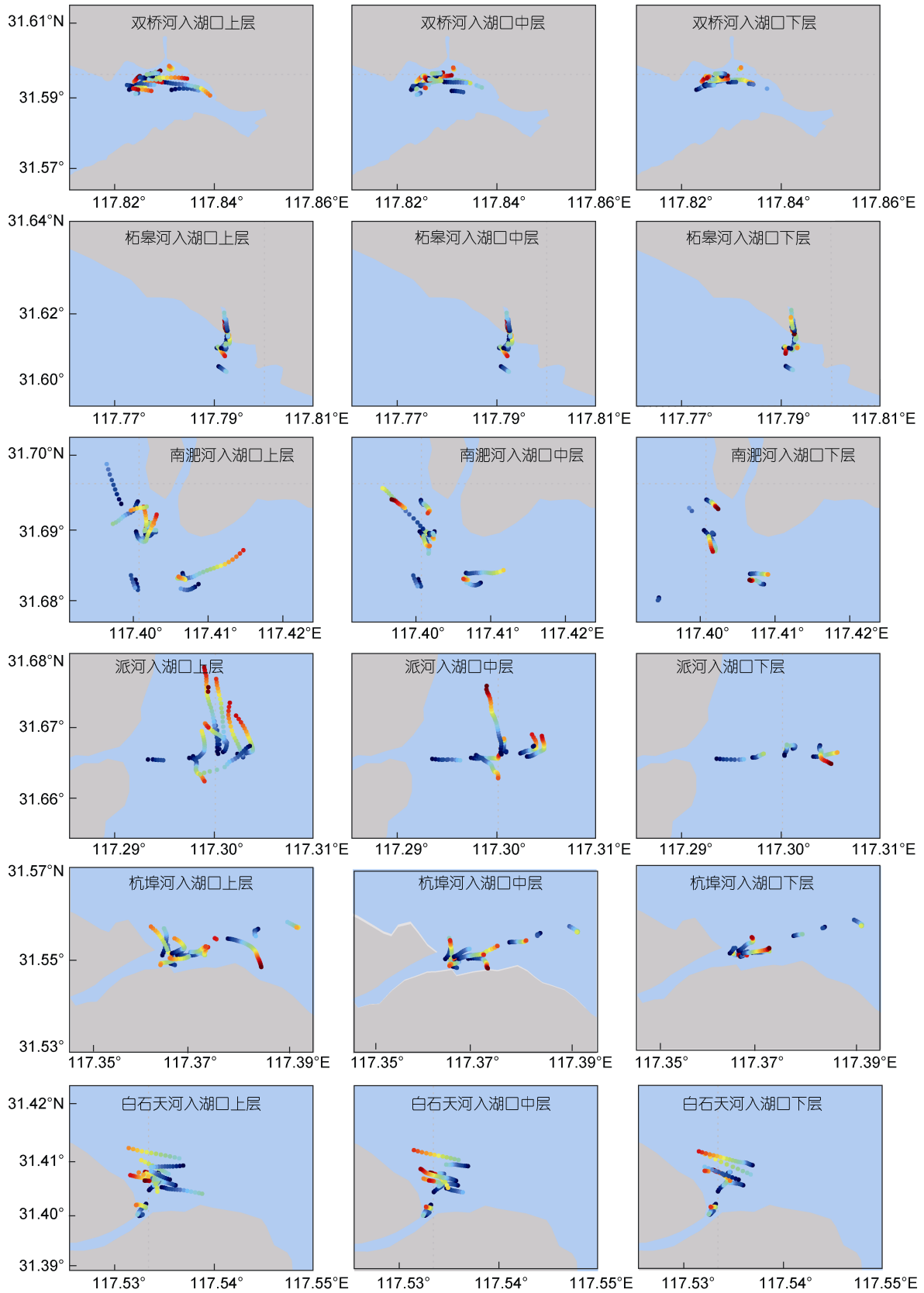
南淝河为连接合肥市和巢湖的重要航道, 同时也是巢湖第二大入湖河流和最大的污染物来源。为减小小船对追踪试验的干扰并保证观测仪器的安全, 拉格朗日水质点追踪仪投放在航道两侧约 200—300 m 处。从图 7 可以看出, 南淝河入湖区水体流动轨迹相当复杂。如同样为投放在航道西侧的观测仪器, 2019 年 3 月 12 日观测到水体为向西北方向流动, 但 3 月 28 日表层和中层表现为先向东南方向, 后转为东北方向流动。

派河位于巢湖西岸, 同样为流经合肥市区的重要污染河流。同图 7 中可以看出, 派河水入湖后不同水层水体流动轨迹存在一定的差异。表层水体入湖后并未径直向东流动, 而是先向东, 后转向北向及北偏西方向, 仅有一次观测为向东南方向流动。中层水体总体流动方向与表层相近, 但观测到的水体流动路径较短, 说明流速相比表层更为缓慢。底层水体总体向东部湖区流动, 但流速更为缓慢。

杭埠河为巢湖最大的入湖河流, 多年平均入湖水量占河流全部入湖水量的近 5 成(Peng *et al.*, 2019)。杭埠河水入湖后流动轨迹较为复杂多变, 表层流总体转向河口东西两侧, 而中层和底层总体向湖心方向流动。

**3.2.2 水体流速** 计算了巢湖 7 条主要入湖河道河水入湖后表、中、底层水体同步流速和方向, 图 8 给出了两条重污染城市河流南淝河和派河, 以及最大入湖河流杭埠河的计算结果。图中每一个箭头代表 10min 平均流速, 箭头的长度代表流动速度, 箭头指向代表流动方向, 由于篇幅所限, 图中仅给出追踪到的前 500min 分层水体同步速度。

从图中可以看出, 同一河口处在水体的流动方向差异很大, 甚至在同一测次都会出现快速转折的情况。如杭埠河在 2018 年 9 月 1 日各层水体流动方向由东北方向, 后逐渐向东向偏转, 后表层和底层重新转为东北方向, 而中层水体转为南偏东方向。同时尽管不同水层流动方向总体同步性较好, 但有些时段某些河口差别较大。如南淝河在 2018 年 9 月 1 日表层和中层水层流向整体为西北方向, 但底层为南向转南偏西方向。





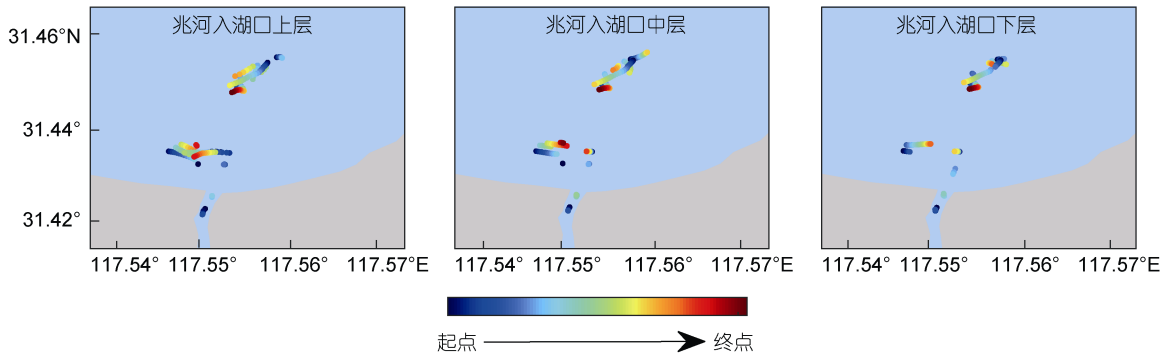


图 7 巢湖 7 条主要入湖河道水体入湖追踪结果

Fig.7 Water pathways in estuaries of seven major tributaries of Chaohu Lake

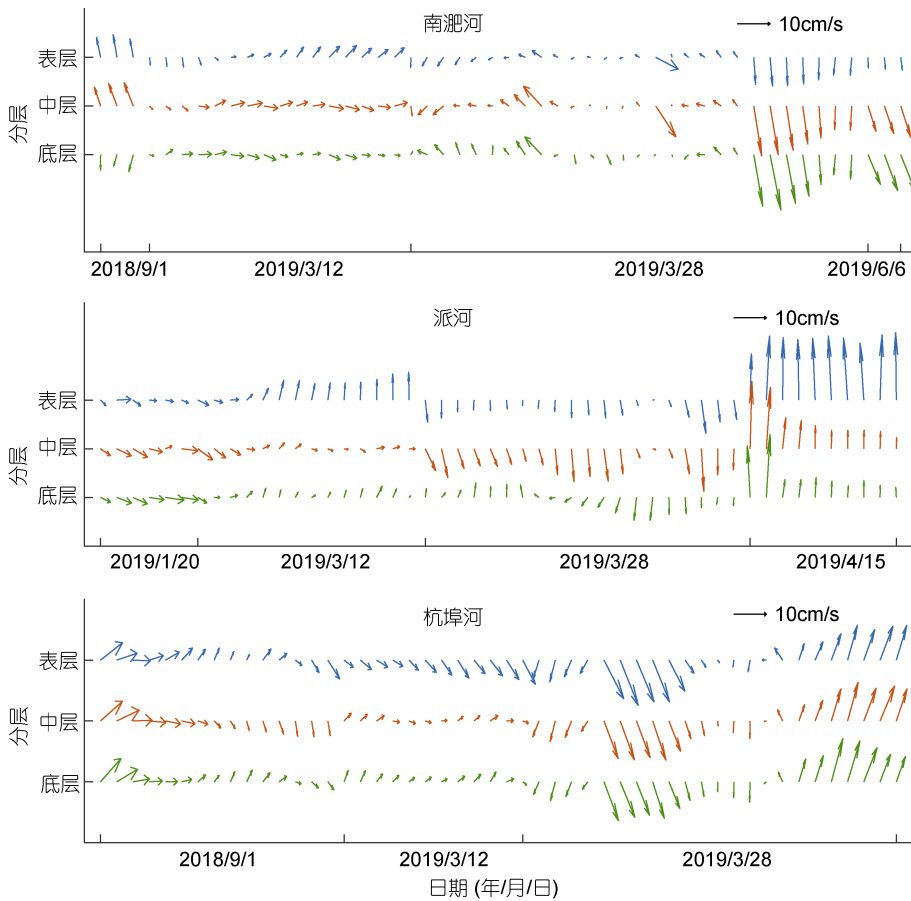


图 8 巢湖 3 条主要入湖河道分层水体流速时间序列

Fig.8 The time series of the velocity and direction of water in surface, middle, and bottom layers in three main estuaries of Lake Chaohu

另外一方面, 尽管不同水层流速有所差异, 表现为自上而下逐渐减缓, 但流速速度和方向随时间的变化总体具有较好的同步性。

图 9 显示了巢湖 7 条出入湖河流河口处表、中、底各层水体流速的同步观测结果。从图中可以看出, 同洪泽湖一样, 巢湖各出入湖河流河口处水体总体呈现由表层到底层流速逐渐减慢的趋势, 且各个河

口水体流速波动较大。相比其他河流, 南淝河河口流速波动相对较小。

### 3.3 洪泽湖、巢湖河流水体入湖流动速度对比分析

图 10 对比了洪泽湖与巢湖各主要河流出入湖口门处表、中、底各层水体流速。红色柱状图分别代表洪泽湖淮河北、南两个入湖口、三河闸、淮沭河和徐洪河口处流速; 蓝色柱状图依次代表巢湖双桥河、

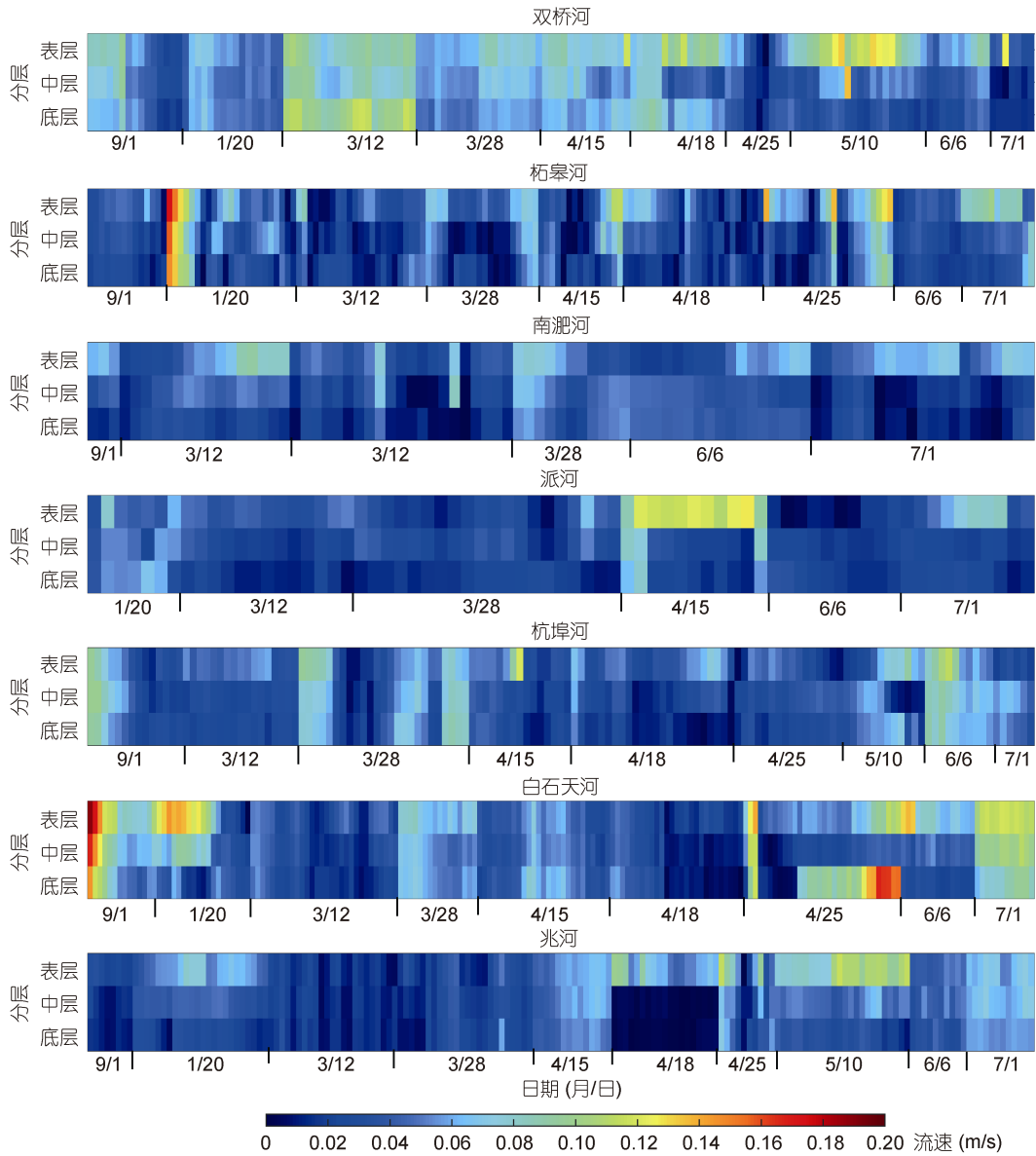


图9 巢湖7条主要入湖河道分层水体流速

Fig.9 The concurrent flowing velocity of water in surface, middle, and bottom layers of seven main estuaries of Chaohu Lake

柘皋河、南淝河、派河、杭埠河、白石天河和兆河河口处流速。柱状图上、下边界分别代表流速多次观测值的 10%和 90%分位数；红色和蓝色柱状图代表流速 10%和 50%分位数；红色和蓝色虚线代表各层多次测量平均流速。

结果表明，洪泽湖和巢湖主要河流河水入湖后流速全部呈由表层至底层逐渐降低的特征，洪泽湖各层流速大于巢湖。洪泽湖河口表层水体 8 次测量平均流速为 6.11cm/s；巢湖为 5.51cm/s；二者中层水体流速分别为 5.32cm/s 和 3.85cm/s；底层则分别为 4.96cm/s 和 3.67cm/s。

对于洪泽湖，位于成子湖的徐洪河河水入湖后表层水体流速最快，多次测量平均流速的中位数达到 6.76cm/s；其次是淮河北侧入湖口门处，为 5.88cm/s。三河闸由于在 2019 年观测时段内全部处于关闭状态，因此表层水体流速最小，仅为 2.93cm/s。对于中层水体，淮河南侧入湖口流速最大，为 5.60cm/s；其次为淮沭河的 4.98cm/s。淮河北侧入湖口流速远低于其他河流，仅为 2.97cm/s。对于底层水体，依然是淮河南侧入湖口最大，北侧入湖口最小，分别为 4.98cm/s 和 1.33cm/s。

对于巢湖，位于巢湖闸附近的双桥河河水入湖

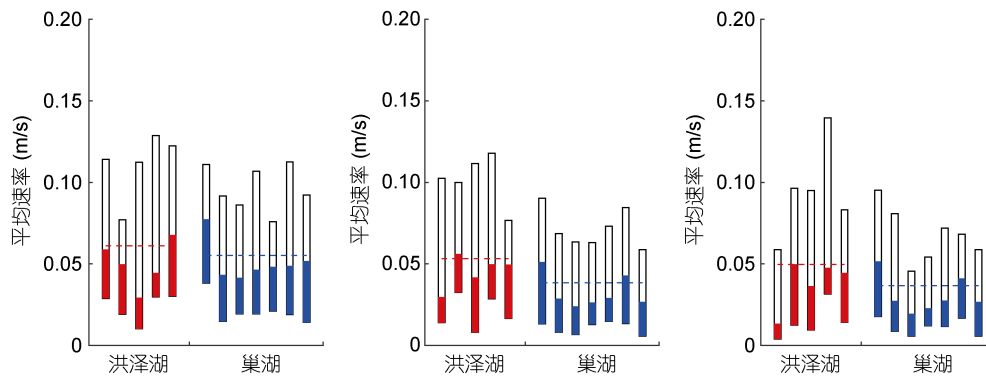


图 10 洪泽湖、巢湖主要河道入湖河水流速对比分析

Fig.10 Comparison in flowing velocity of different layers in main river estuaries of Hongze Lake and Chaohu Lake

注: 红色柱状图分别代表洪泽湖淮河北、南两个入湖口、三河闸、淮沭河和徐洪河河口处流速; 蓝色柱状图依次代表巢湖双桥河、柘皋河、南淝河、派河、杭埠河、白石天河和兆河河口处流速; 柱状图上、下边界分别代表流速多次观测值的 10%和 90%分位数; 红色和蓝色柱状图上下边界代表流速 10%和 50%分位数; 红色和蓝色虚线代表各层多次测量平均流速

后表层水体流速最快, 多次测量所有 10min 平均流速的中位数达到 7.73cm/s, 远高于其他河流。其次为兆河入湖口处, 为 5.18cm/s。巢湖闸是湖水唯一出湖通道, 兆河入湖流量也受兆河闸控制, 巢湖其他河流干流上都没有控制性水利工程, 因此双桥河和兆河水体入湖后流速快并不出乎意料。巢湖其他主要河流河水入湖后表层水体流速差别不大, 介于 4.33—4.88cm/s, 其中南淝河最小, 为 4.33cm/s。巢湖主要河流入湖后中层和底层水体流速分布极其相似, 仍旧是双桥河最大, 中层和底层分别为 5.12cm/s 和 5.15cm/s, 其次为白石天河, 中层和底层分别为 4.28cm/s 和 4.10cm/s; 其他河流中层和底层水体流速全部在 3cm/s 以下, 南淝河仍为最小, 分别仅有 2.38cm/s 和 1.94cm/s。

#### 4 讨论

本文利用拉格朗日随体法水质点追踪仪观测并

计算和分析了洪泽湖和巢湖主要河流出入湖河口处的运移轨迹和流速特征, 表 2 进一步对比分析了洪泽湖 4 条出入湖河流河口区表层水体流速与观测期间河道出入湖流量之间的关系。从表中可以看出, 尽管淮河和徐洪河入湖区水体流速与河道流量呈现出一定的正相关关系, 但相关系数分别仅为 0.25 和 0.16, 都没有通过置信度为 0.05 的显著性检验, 说明了河口区流场的复杂性和影响要素的多源性。对于洪泽湖和巢湖等浅水湖泊, 流场主要由湖面风场驱动的风生流, 河流出入湖水量驱动的吞吐流, 以及由于湖泊水体温盐变化形成的密度流共同组成。在远离河口的敞水湖区, 吞吐流一般不到 mm/s 量级, 相比风生流非常微小, 而密度流更小, 几乎为可忽略的程度, 因此风生流为流场的主要成分。而河口区流场形态则受到湖面风场、出入湖水量、湖泊水位, 河口区岸线形态和湖底地形等多重要素共同影响, 导致河口区的流场结构具有更高的复杂性, 流场的大小和方向呈

表 2 洪泽湖主河口区域表层流速(m/s)与出入湖流量(m<sup>3</sup>/s)对照

Tab.2 Comparison in the velocity (m/s) in top layers of four main river estuaries of Hongze Lake with inflows (m<sup>3</sup>/s)

日期(年/月/日)	流量(m <sup>3</sup> /s)				流速(m/s)			
	淮河	三河闸	淮沭河	徐洪河	淮河	三河闸	淮沭河	徐洪河
2019/3/22	511	0	167	-	0.097	0.022	0.13	0.058
2019/5/17	233	0	250	29.8	0.062	0.08	0.104	0.093
2019/5/19	219	0	215	21	0.053	0.117	0.044	0.106
2019/8/14	49.4	0	365	229	0.083	0.043	0.033	0.073
2019/8/15	47.2	0	317	195	0.032	0.065	-	0.065
2019/9/10	89.6	0	325	24.5	0.139	0.028	0.053	0.018
2019/9/11	81.4	0	320	15.1	-	0.065	-	0.05
2019/10/27	34.2	0	34.7	0	0.039	0.012	0.033	0.04

注: -表示缺少观测

非稳定状态。另外湖面风场存在时间和空间的快速变化,同时出入湖流量也存在较大幅度的时空波动,导致河口区流场大小呈现较大的随机性和偶然性,其观测和特征提取相当困难。因此,在下一步的工作中,需要加强在无风或较小风速条件下的不同出入湖流量背景下河口区流场观测,以便充分认识河道出入湖水量对于河口区水体流速的影响规律。

## 5 结论

利用耦合北斗和 GPS 双定位系统的拉格朗日随体法水质点追踪仪,开展了不同水位背景下洪泽湖、巢湖主要河流水体出入湖流动轨迹、速度和方位的分层同步追踪观测。主要结论如下:

(1) 洪泽湖和巢湖各主要河流入湖河水流动轨迹和速度具有较高的时间和空间差异,甚至在同一测次都会出现急剧转向的情况;部分河流如洪泽湖的徐洪河和巢湖的柘皋河输移方向往复不定;

(2) 洪泽湖同一河口在同时段内上、中、下不同水流层流速差别较大,但多数时段内流动方向较为相近,并且流向的转变具有较好的同步性;

(3) 洪泽湖主要入湖河流-淮河北侧入湖口处水体从西部入湖后,并未径直向东侧的湖心位置输移,而是转向南、北两侧;

(4) 洪泽湖河口处各层水体流速大于巢湖,二者水体流速都表现为由表层至底层逐渐降低,洪泽湖河口表层水体 8 次测量平均流速为 6.11cm/s;巢湖为 5.51cm/s;二者中层水体流速分别为 5.32cm/s 和 3.85cm/s;底层则分别为 4.96cm/s 和 3.67cm/s。

(5) 对于洪泽湖,徐洪河河水入湖后表层水体流速最快,中位数达到 6.76cm/s;对于中层和底层水体,淮河南侧入湖口流速最大,为 5.60cm/s 和 4.98cm/s。对于巢湖,双桥河河水入湖后各层水体流速最快,多次测量中位数达到 7.73、5.12 和 5.15cm/s。

## 参 考 文 献

- 刘晓辉, 陈大可, 董昌明等, 2015. 利用拉格朗日方法研究台湾东北黑潮路径变化. 中国科学: 地球科学, 45(12): 1923—1936
- 李子超, 周涛, 司广成等, 2020. 基于拉格朗日方法的核素近海迁移计算. 核动力工程, 2020, 41(2): 72-77
- 陈毓敏, 项杰, 杜华栋等, 2019. 基于拉格朗日方法对黑潮路径的数值模拟. 海洋预报, 36(6): 22—28
- 蔡阳, 陆欣鑫, 巴秋爽等, 2019. 镜泊湖春、夏两季浮游生物群落结构及其与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 50(1): 116—128
- Du J B, Park K, Yu X *et al*, 2020. Massive pollutants released to Galveston Bay during Hurricane Harvey: understanding their retention and pathway using Lagrangian numerical simulations. *Sci Total Environ*, 704: 135364
- Guha A, 2008. Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow. *Annu Rev Fluid Mech*, 40: 311—341
- Kazi T G, Arain M B, Jamali M K *et al*, 2009. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study. *Ecotoxicol Environ Saf*, 72(2): 301—309
- Lai A C K, Chen F Z, 2007. Comparison of a new Eulerian model with a modified Lagrangian approach for particle distribution and deposition indoors. *Atmos Environ*, 41(25): 5249—5256
- Peng Z L, Hu W P, Liu G *et al*, 2019. Estimating daily inflows of large lakes using a water-balance-based runoff coefficient scaling approach. *Hydrol Process*, 33(19): 2535—2550
- Saidi M S, Rismanian M, Monjezi M *et al*, 2014. Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches in predicting motion of micron-sized particles in laminar flows. *Atmos Environ*, 89: 199—206
- Van Sebille E, Griffies S M, Abernathey R *et al*, 2018. Lagrangian ocean analysis: fundamentals and practices. *Ocean Model*, 121: 49—75
- Xu Z M, Han Z M, Qu H W, 2020. Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches for prediction of particle deposition in turbulent flows. *Powder Technol*, 360: 141—150
- Zhu X X, Chatain V, Gautier M *et al*, 2020. Combination of Lagrangian Discrete Phase Model and sediment physico-chemical characteristics for the prediction of the distribution of trace metal contamination in a stormwater detention basin. *Sci Total Environ*, 698: 134263

## WATER PARTICLE TRACKING IN INFLOW WATER FOR HONGZE LAKE AND LAKE CHAOHU BASED ON LAGRANGIAN METHOD

PENG Zhao-Liang<sup>1</sup>, CHEN Chang-Ren<sup>2</sup>, WAN Jun<sup>2</sup>, WU Xiao-Bing<sup>2</sup>, ZHANG Yi-Hui<sup>1</sup>,  
HU Wei-Ping<sup>1</sup>, CUI Jian<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2. *Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223100, China*)

**Abstract** The Beidou and GPS dual positioning system were used to observe the pathways, flowing velocity and direction at estuaries of Hongze Lake and Chaohu Lake in China, and water particle tracking was conducted based on the Lagrangian method. Observations were carried out in surface, middle, and bottom layers of tributaries in estuary for the two lakes during September 2018 to October 2019. Results suggest that the flowing direction of water at the main estuary of the Huaihe River turn to the north and south sides, while the water direction of the Xuhong River estuary are reciprocating, and the flowing velocity in the surface layer of the river was the largest amongst the five tributary rivers. The operation status of the Chaohu sluice had a strong influence on the direction and velocity of the Shuangqiao River to Chaohu Lake, and the velocity in each layer of the river was the largest among the seven tributary rivers. The flowing velocity in all estuaries of the two lakes gradually decreased from the surface layer to the bottom layer. The overall flow velocity of each layer of Hongze Lake was larger than that of Chaohu Lake. The average flowing velocity in eight observations and five estuaries for surface layer of Hongze Lake was 6.11cm/s and 5.51cm/s for Chaohu Lake. The flowing velocity of the middle layer was 5.32cm/s and 3.85cm/s, and of the bottom layer was 4.96cm/s and 3.67cm/s, respectively in Hongze Lake and Chaohu Lake.

**Key words** Lagrange method; particle tracking; Hongze Lake; Chaohu Lake; flowing velocity