

“引江济太”影响下太湖贡湖湾潮流时空变化^{*}

马 明^{1,2,3}, 殷焱杰^{1,2,4}, 石亚东^{1,2}, 沈晓腾³, 吴东浩^{1,2**}, 陈 鹏^{1,2}, 任俊宏^{1,2,5}

(1: 太湖流域水文水资源监测中心, 无锡 214024)

(2: 水利部太湖流域水治理重点实验室, 无锡 214131)

(3: 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210024)

(4: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(5: 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214000)

摘要: “引江济太”作为流域骨干调水工程, 对贡湖湾潮流的影响一直受到较多关注。2022年夏季(8月25日—9月5日)和2023年冬季(1月18日—2月28日), 在贡湖湾布设9个站点, 开展“引江济太”和风场共同影响下的贡湖湾潮流运动特征研究。通过监测氯离子浓度分布来分析“引江济太”作用下江水入贡湖湾后输移规律, 并建立数值模型, 基于示踪粒子验证模型的可靠性。夏季和冬季贡湖湾垂向平均流速均呈现出河口区和交界断面区高、中间过渡区低的特点, 河口区潮流主要受“引江济太”影响, 中间过渡区、交界断面区潮流主要受风场影响。贡湖垂向平均流场可分为顺时针、逆时针、中间进两岸出、中间出两岸进4种类型。“引江济太”一定程度上会加快贡湖部分水域的流速, 贡湖中轴线处流速的改善作用最为明显。

关键词: “引江济太”; 贡湖湾; 流场; 示踪离子; 原位观测; 数值模拟

Temporal and spatial changes of lake current in Gonghu Bay under the influence of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu^{*}

Ma Ming^{1,2,3}, Yin Yijie^{1,2,4}, Shi Yadong^{1,2}, Shen Xiaoteng³, Wu Donghao^{1,2**}, Chen Peng^{1,2} & Ren Jun-hong^{1,2,5}

(1: *Taihu Basin Monitoring Center of Hydrology and Water Resources, Wuxi 214024, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Management and Protection of the Ministry of Water Resources, Wuxi 214131, P.R.China*)

(3: *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, P.R.China*)

(4: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

(5: *College of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, P.R.China*)

Abstract: As a watershed important water transfer project, the influence of Water Diversion from Yangtze River to Lake Taihu Project(WDYT) on the lake current of Gonghu Bay has always received a substantial amount of attention. During the summer of 2022 (August 25–September 5) and the winter of 2023 (January 18–February 28), nine sites were set up in Gonghu Bay to conduct a study on the movement characteristics of the lake current under the combined influence of WDYT and the wind field. It was proposed that chloride ions could serve as natural tracers to observe and simulate the movement characteristics of the Yangtze River water entering Gonghu Bay, and a numerical model was established. The reliability of the model was verified based on tracer particles. Both in summer and winter, the vertical average current velocity in Gonghu Bay showed high values in the estuarine area and boundary section, but low values in the intermediate transition zone. Current velocity in the estuarine area was primarily influenced by WDYT, while current velocity in the intermediate transition area and boundary section was mainly affected by the wind field. The

* 2023-10-17 收稿; 2024-05-14 收修改稿。

水利部重大科技项目(SKS-2022065)资助。

** 通信作者; E-mail: wudonghao@126.com。

vertical mean current field of Gonghu Bay could be divided into four types: clockwise, anticlockwise, two sides in, middle out and two sides out, middle in. To some extent, WDYT will speed up the current rate of some areas of Gonghu Bay, and the diversion of water has an obvious effect on the improvement of current velocity at the central axis of Gonghu Bay.

Keywords: Water diversion from Yangtze River to Lake Taihu; Gonghu Bay; current field; tracer ion; field observation; numerical simulation

太湖是中国仅次于鄱阳湖和洞庭湖的第三大淡水湖泊,平均水深不超过2 m,是一个典型的大型浅水湖泊^[1]。贡湖湾位于太湖的东北部,作为苏州、无锡两地的饮用水水源地,对于支撑保障地方经济社会发展具有重要作用。“引江济太”工程是流域水资源调度的主要通道,其通过引入长江清水进入贡湖,可有效加快贡湖水体交换与复氧速率,并提高水体净化能力^[2]。流场是水流运动及污染物在湖泊内迁移扩散的重要影响因子^[3-4],掌握贡湖的流场运动特征,对于定量分析“引江济太”工程对太湖生态环境的影响具有重要意义。

浅水湖泊湖流研究主要有原位观测、数值模拟和物理模型3种方法,其中以原位观测和数值模拟为主。原位观测可真实得到实际气象和地形条件下的湖流运动特征,一般是通过多普勒流速剖面仪定点观测或巡测^[5-7]。数值模拟可以全方位认识在不同要素驱动下湖流的运动特征,一般是基于构建的数学模型开展相关研究^[8-10]。但一直以来,湖流的验证主要通过对比分析实测及模拟的流速、流向等指标,技术手段较为有限。一些学者通过粒子追踪技术研究表层湖流运动特征^[11-12],但湖流为非稳态运动使得粒子迁移存在一定随机性,且这一随机性会随着时间累积发生更大偏差。近年来,同位素示踪技术逐步得到广泛应用。Birkel等通过模拟示踪剂浓度动态,实现了对苏格兰吉诺克流域水流路径和来源的示踪^[13]。Zhang等通过钍天然同位素分析了外源输入对我国青海湖水环境的影响^[14],为湖流观测及模型验证提供了一种新思路。地表水常见的天然离子包括钙离子(Ca^{2+})、氯离子(Cl^-)等八大离子^[15],随着流域水文气象及污染治理工作的不断深入,流域天然离子浓度发生较大变化,部分离子河湖浓度差明显增大^[16-17],同时天然离子具有较强的溶解性、化学性质稳定、检测方法简单等特点^[18],利用湖泊与河道离子浓度存在差异的特性,可实时监测 Cl^- 浓度变化来分析“引江济太”作用下江水入贡湖后的输移规律,同时 Cl^- 可从时间和空间两个方面验证模型,为湖流分析提供新的手段。

一直以来,国内外学者关于贡湖湖流已开展了较多的研究,但研究时段并非“引江济太”调水期间^[19-20],无法科学反映“引江济太”工程影响下贡湖湖流运动特征。2022年夏季,太湖流域干旱少雨,梅雨期(6月12日—7月1日)降雨量为75.4 mm,较常年偏少近70%,出现“空梅”现象;出梅后流域持续晴热高温少雨,出现罕见夏秋连旱,多站水位一度位列1951年以来最低,长江口遭遇史上最早咸潮入侵。期间,太湖流域管理局组织实施长时间“引江济太”工程调度,为开展“引江济太”工程影响下贡湖湖流观测及模拟提供了基础条件。本研究于2022年夏季和2023年冬季两次“引江济太”调水期间,在贡湖布置9台坐底式声学多普勒流速剖面仪(ADCP),进行湖流长期野外观测,并同步在固定点对 Cl^- 进行监测,通过 Cl^- 浓度分布的变化反映引水入湖后长江水在贡湖的扩散过程,同时,构建太湖二维水动力模型,采用天然示踪离子对模型进行验证,探究不同风场条件下的贡湖湖流变化特征,以期为长江水入贡湖后的运动规律提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖流域地处长江中下游地区,贡湖湾位于太湖东北部,水面积约 164 km^2 ,多年平均水深不超过2 m。贡湖湾地区属亚热带季风气候,温暖湿润,年平均气温 $16\sim18^\circ\text{C}$,年降水量 $1100\sim1150 \text{ mm}$ ^[2]。贡湖湾西南与太湖湖心相连,东北与望虞河相连(图1)。贡湖是周边城市的重要水源地,由于蓝藻大规模暴发,曾引发供水危机^[4]。“引江济太”工程通过望虞河将较为优质的长江水直接引入贡湖湾,加快贡湖及太湖的水体交换,改善了水源地水质状况。

1.2 “引江济太”调度概况

2022年7月—2023年3月,“引江济太”调度总体可以划分为3个阶段,合计入湖水量 13.2 亿 m^3 。其

中,第一阶段为7月20日—9月12日,共持续54 d,通过望亭水利枢纽累计入湖水量4.3亿m³;第二阶段为9月27日—12月10日,共持续73 d,望亭水利枢纽累计调水量5.8亿m³;第三阶段为2023年1月18日—3月10日,共持续51 d,望亭水利枢纽累计调水量3.1亿m³(表1)。贡湖水面积160 km²,第一阶段引水期间贡湖平均水深约为2.0 m,蓄水量约为3.2亿m³,在第一、第二阶段引水工况下,贡湖水体可被完全置换。

表1 望亭水利枢纽调水量

Tab.1 Water diversion volume of Wangting hydro-junction

引水季节	引水时间	调水流量/(m ³ /s)	入湖水量/万 m ³	备注
夏季	2022年7月20—21日	50	218	开展流场、风场及示踪离子调查
	2022年7月22日—8月11日	80	14303	
	2022年8月12日—9月3日	100	20210	
	2022年9月4日—9月7日	0~50	899	
	2022年9月8日—9月12日	100	4408	
秋季	2022年9月27日—10月27日	50~80	19594	未开展监测
	2022年10月28日—12月10日	100	38465	
冬季	2023年1月18日—1月31日	0~50	4720	开展流场、风场及示踪离子调查
	2023年2月1日—3月10日	50~80	26226	

1.3 风场、潮流野外观测

2022年夏季(8月25日—9月5日)、2023年冬季(1月18日—2月28日)在贡湖全区域进行了2次潮流野外观测。在GH1、GH2、GH5、GH7、GH8、GH11、GH12、GH13、GH15及GH17分别布设一台 LanOcean 声学多普勒测流剖面仪(ADCP)及风速风向仪,覆盖望虞河口区域、贡湖湾中心区域以及贡湖湾与大太湖交界处,其中GH2布设在望虞河入湖口(河口区),GH5、GH7、GH8、GH11布设在中部水域(中部过渡区),GH12、GH13、GH15、GH17布设在贡湖与大太湖交界附近(交界断面区),GH8、GH12、GH15分别布设在金墅湾水厂、南泉水厂及上山水厂附近(图1)。在每个监测站点分别放置一台ADCP和MULTI-5P型风速风向仪,使用气囊式升降支架将ADCP安装在湖底,采集垂线潮流数据并通过通信线缆传输至测站工控机,将风速风向仪按照统一高度固定至设备平台,采集数据并通过通信线缆传输至测站数据采集仪。

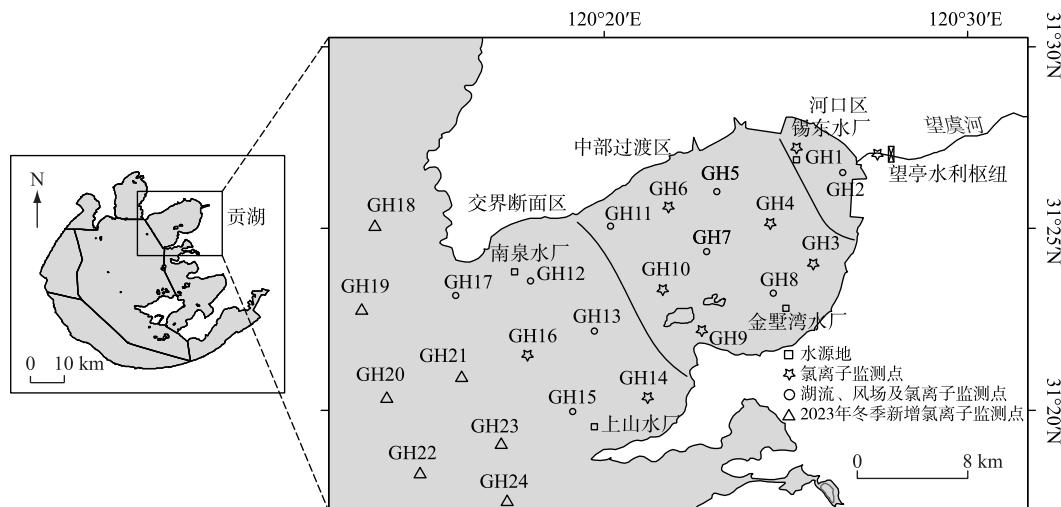


图1 贡湖湾监测点位布设

Fig.1 Distribution of monitoring sites in Gonghu Bay

ADCP 参数设置为仪器高和盲区共计约 60 cm,采样频率 15 min/次,发射频率为 1200 Hz,该仪器对水体流速的测量范围为 ± 5 m/s,测量误差为水体流速的 $\pm 0.3\%$ 。表层水体定义为去除 ADCP 表层盲区(约为水深的 6%)后监测数据较为完整的最上层 20 cm 水层。在监测湖流的同时,在 9 个站点同步监测风场,风速风向仪安装高度为 10.3 m,风向传感器测量精度为 $\pm 3^\circ$,分辨率 0.1°,风速传感器测量范围为 0~60 m/s,测量精度为 ± 0.2 m/s,分辨率 0.1 m/s,数据采集频次为 1 次/5 min。

1.4 天然示踪离子采样与监测

在 2022 年夏季“引江济太”期间,在贡湖均匀布设 17 个点位(GH1~GH17),并在望虞河来水控制枢纽(望亭水利枢纽)闸下布设 1 个点位,共计 18 个点位(图 1),2023 年冬季“引江济太”期间在原点位基础上新增 7 个监测点位(GH18~GH24),观测长江水出湖后的扩散情况。采集水面以下 0.5 m 处的水样,带回实验室根据检测标准(SL86—1994)进行 Cl^- 测定。采样频次为 2 次/周,部分时段由于太湖风浪较大,采样频次适当降低。

1.5 模型构建

采用 MIKE21 模型模拟“引江济太”期间贡湖湖流运动特征。由于贡湖为太湖的子湖区,与大太湖存在水体交换,因此将模型计算范围设置为整个太湖湖区。太湖湖区地形采用 2019 年实测地形资料。风场数据来源于欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 数据,其表面风场数据的空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,时间分辨率为 1 h。太湖流域水系发达,流域内众多河道与太湖相连通,其中直接出入太湖的河流多达 228 条,根据环湖河道多年实测流量资料,将出入湖河道概化成 24 条(图 2a),其入湖径流总量占全湖入湖径流量的 90% 以上,太湖西岸河流以入湖为主,太湖东岸河流以出湖为主,模型中河道流量以随时间变化的形式参与模型计算,流量为正代表入湖,流量为负代表出湖。由于太湖东侧与北侧湖岸线较为曲折,为使网格更好地贴合岸线,模型采用三角形的非结构化网格,平面上共划分了 9923 个网格单元,节点总数为 5369 个,对贡湖、河流入湖口及岛屿附近区域进行了网格加密处理,加密处平均网格边长为 350 m(图 2b)。

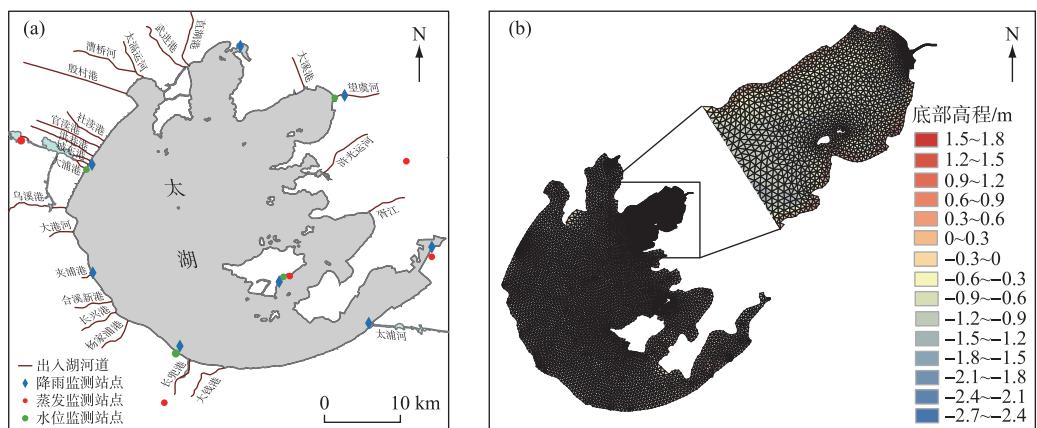


图 2 太湖主要河道、降雨蒸发站点、水位站点分布(a)及太湖地形网格划分(b)

Fig.2 Main inflow/outflow rivers, monitoring sites for rainfall, evaporation and water level (a), and grid system for MIKE21 (b) of Lake Taihu

模拟时间为 2023 年 1 月 14 日—2023 年 3 月 10 日(冬季“引江济太”开始前 4 天至“引江济太”结束),时间步长为 300 s,定义干水深 0.005 m,淹没水深 0.05 m,湿水深 0.1 m。太湖属于浅水湖泊,垂向密度变化不大,密度梯度可以忽略不计^[21]。模型综合考虑风力、糙率和科氏力的作用,糙率与水深、床面形态有关。为了保证湖区的水量平衡,模型将环太湖 8 个站点日降雨量和 5 个站点的日蒸发量资料以随时空变化的形式参与水动力模型计算。模拟初始水位采用望亭及小梅口 1 月 14 日 0:00 时的监测水位数据以反距离权重法插值方式得到全湖初始水位,望亭、小梅口水位站的位置如图 2a 所示,且望亭水位站位于贡湖内。

2 结果与讨论

2.1 引水入湖后长江水扩散特征

夏季引江期间调查结果显示,贡湖 Cl^- 平均浓度呈现出明显的“高—低”变化(图 3a)。7月 21 日,望亭水利枢纽闸门开启,调引的长江水尚未进入贡湖,当天贡湖 Cl^- 平均浓度为 40.2 mg/L,约为长江水的 2.5 倍。7月 25 日,锡东水厂及河口区 Cl^- 浓度与望亭水利枢纽基本相当,明显低于中部过渡区,表明在引水流量 80 m^3/s ,累计入湖水量约为 2700 万 m^3 的情况下,长江水 4 d 内可覆盖整个河口区。7月 29 日,调引的长江水已扩散至金墅湾水厂(GH8)周边水域。8月 1 日—8月 3 日,调引的长江水扩散至中部过渡区,即在 80 m^3/s 的入湖流量下,长江水大约需要 11~13 d 可覆盖整个中部过渡区,需要约 1 亿 m^3 的总引水量。8月 11 日,长江水对整个贡湖产生影响,当日上山水厂(GH15)、南泉水厂(GH12)附近水域 Cl^- 浓度均为 26.0 mg/L,较 7 月 21 日降低了 32.5%,表明长江水入贡湖后进入大太湖约需 20 d,即在引水流量为 80~100 m^3/s 的情况下,累计约 1.6 亿 m^3 的总引水量,长江水可全面影响贡湖。8月 15 日—8月 21 日,位于贡湖与梅梁湖交界处 GH17 的 Cl^- 浓度显著低于 7 月 21 日的背景值,表明长江水已扩散至贡湖与梅梁湖交界处,说明有部分长江水会向梅梁湾扩散,大部分由西南方向进入大太湖和东部沿岸区。8月 25 日—9月 7 日,交界断面区 Cl^- 浓度存在较大空间差异,西北水域明显高于西南水域,表明大太湖水体进入贡湖湾西北部,进一步推动了长江水从贡湖湾口西南部进入大太湖水域。夏季“引江济太”期间, Cl^- 跟踪调查全面反映了调引的长江水对贡湖的影响过程,即调引的长江水进入贡湖后,主要经“锡东水厂—金墅湾水厂—上山水厂”路线出贡湖,大太湖的湖水从南泉水厂方向进入贡湖。

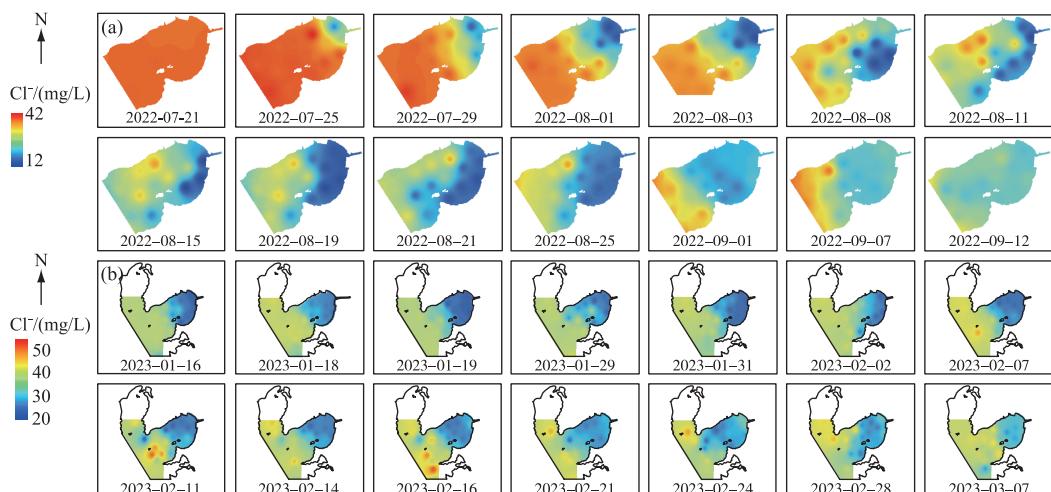


图 3 2022 年夏季(a)与 2023 年冬季(b)引水期间贡湖 Cl^- 浓度的空间变化

Fig.3 Spatial distributions of chloride ion concentration during water diversions in the summer of 2022 (a) and in the winter of 2023 (b) at Gonghu Bay

受前期调水影响,冬季“引江济太”期间贡湖 Cl^- 浓度明显低于夏季(图 3a,b)。1月 16 日,锡东水厂和金墅湾水厂 Cl^- 浓度分别为 23.4 和 25.0 mg/L,河口区及中间过渡区 Cl^- 平均浓度为 25.8 mg/L,明显低于交界断面区(38.8 mg/L)。2月 21 日,上山水厂(GH15)和南泉水厂(GH12) Cl^- 浓度分别为 34.1 和 25.5 mg/L,明显低于交界断面区初始 Cl^- 浓度,表明调引的长江水已基本将贡湖水置换完毕。之后,交界断面区的 Cl^- 浓度在 32.5~41.1 mg/L 之间波动,河口区和中间过渡区 Cl^- 浓度维持较低水平并基本保持稳定。总体来看,在开展冬季引江之前,开展了长时间的秋季引水,使得冬季“引江济太”开始时贡湖区域的 Cl^- 还未与大太湖的 Cl^- 混合均匀,贡湖东部 Cl^- 浓度明显低于其他区域,导致冬季 Cl^- 变化相对于夏季不够显著。

2.2 贡湖垂向平均流速空间分布特征

图4为贡湖夏季与冬季监测时段内平均流速空间分布,每个监测点的流速取监测时段内垂向平均流速的平均值。观测结果表明:贡湖垂向平均流速总体较小,夏季平均流速为6.3 cm/s,冬季平均流速为8.0 cm/s。其中,夏季流速主要集中于5~7 cm/s之间,流速小于8 cm/s的区域面积占比在80%以上;河口区和交界断面区流速较高,中间过渡区流速相对较低,其中河口区平均流速约为6.4 cm/s,中间过渡区平均流速约为5.7 cm/s,交界断面区平均流速为7.1 cm/s(图4a)。冬季垂向平均流速主要集中在7.5~9 cm/s之间,河口区平均流速约8.0 cm/s,中间过渡区平均流速约7.9 cm/s,贡湖与太湖交界断面处平均流速为8.1 cm/s(图4b)。

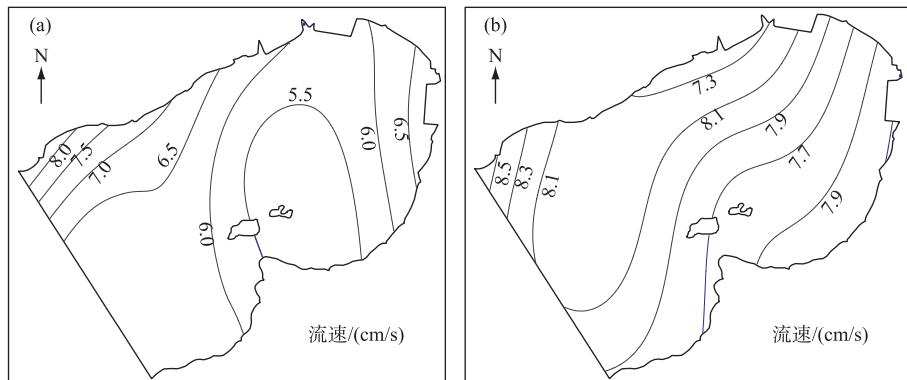


图4 贡湖夏季(a)与冬季(b)平均流速空间分布

Fig.4 Spatial distribution of current velocity in Gonghu Bay during summer (a) and winter (b)

从空间上来看,贡湖垂向平均流速总体呈现出河口区和交界断面区大于中间过渡区的特征。河口区流速较中间过渡区流速大的主要原因是受“引江济太”调水吞吐流影响,河口吞吐流对中部过渡区的影响范围有限,随着远离河口,河口输入流由于过水断面的扩大,流速变小,从而对湖流的影响减弱。交界断面区位于贡湖、梅梁湖和大太湖的交界处,水流复杂,水体交换频繁,流速较大,如夏季GH17的流速在各站点中最大,平均值为7.8 cm/s。另外,一般情况下,湖区长轴(连接湖区内任意两点所能获取的最大长度)的长度越长,且长轴角度与风向的吻合度越高,湖区水体垂向平均流动速率越大^[8],如GH15位于贡湖的西南角,夏季研究期间盛行东北风,因此水体流速也较快。

从时间上来看,冬季贡湖垂向平均流速明显大于夏季,且冬季各水域流速差异较小。吴挺峰等的研究结果表明,太湖湖流主要受风驱动^[19]。选取本研究的部分点位分析流速与风速的关系,结果显示冬季GH2、GH8、GH11、GH17平均流速与风速均呈显著正相关,相关性系数分别为0.82、0.77、0.80和0.88。冬季贡湖平均风速为3.9 m/s,明显高于夏季(3.0 m/s),导致冬季流速高于夏季。同时,冬季河口区、中间过渡区、交界断面区平均风速分别为3.8、3.8、4.0 m/s,风速差异较小,从而导致不同水域平均流速较为接近。另外,冬季调查期间“引江济太”入湖流量较小,平均流量不足50 m³/s,显著小于夏季(100 m³/s),在较小的引水流量下,吞吐流对于入湖口区域流速的改善作用微弱,使得入湖口区域平均流速与中部过渡区平均流速较接近。

2.3 贡湖垂向分层流速分布特征

掌握贡湖垂向分层流速分布规律不仅有助于认识贡湖水流的紊动特性、悬移质运移规律及泥沙沉积与悬浮启动机制,也可为湖泊水质净化、环境污染治理提供科学依据^[22]。从图5可以看出,贡湖流速在垂向上存在明显差异。总体来看,各监测点水表面至水深约30%~40%处流速变化较为剧烈,水深40%以下流速变化较为平缓,表明水表面至水深30%~40%处水体发生着较强的能量传递与耗散,这主要是因为风拖曳力直接作用在水体表层,将能量传递给表层水体产生波浪,波浪增加了表层水体的不平整性,对下层水体的影响随深度增加逐渐减小^[23]。

贡湖表层水体处于风应力影响控制区,流速最大,且流速随水深逐渐减小(图5),与王建威等针对梅梁

湖的研究结论基本一致^[24]。但随着水深的继续增大,水体处于底摩擦力影响控制区^[23],流速出现短暂“反弹”后会再次降低。选取风场基本稳定的时间段,进一步分析研究不同入湖流量对垂向分层流速的影响。9月2日15:00—9月3日12:00,9月3日21:00—9月4日13:00,“引江济太”平均入湖流量分别为100 m³/s和50 m³/s,河口区GH2垂向分层流速“反弹”的水深由水面以下60 cm上升至水面以下50 cm,可见“引江济太”调度流量的大小会对河口区水域流场垂向变化产生较大影响。

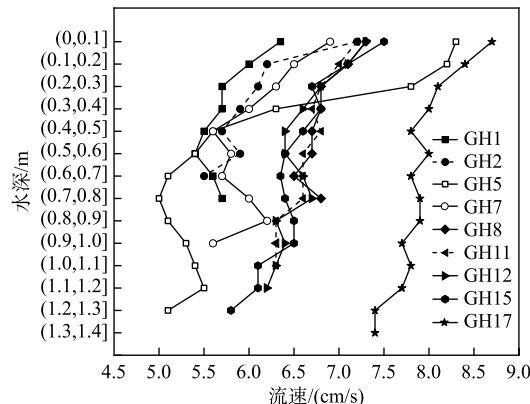


图 5 2022 年夏季贡湖流速的垂向分布

Fig.5 Horizontal velocity at different layers in the summer of 2022

2.4 贡湖垂向平均潮流模拟

2.4.1 模型验证 图 6 给出了小梅口和望亭两个水位监测点的实测水位与模拟水位曲线,可以看出实测水位的涨跌状态与模拟水位曲线基本一致,小梅口和望亭的实测值与模拟值的均方根误差(RMSE)分别为0.0834 和 0.1034,Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.8318 和 0.8098,均达到了较为良好的标准。因此,太湖水动力模型能够很好地模拟太湖水位的变化情况,太湖水量平衡模拟情况较好。

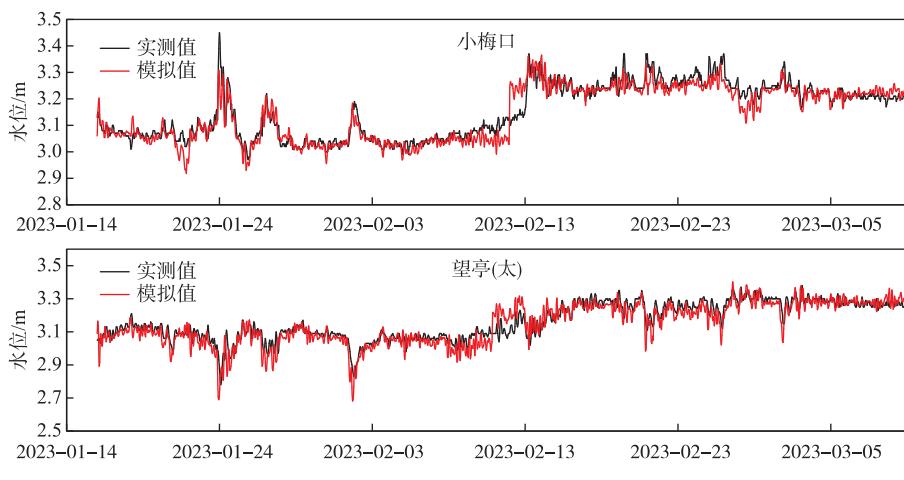


图 6 水位实测值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of measured and simulated values of water level

湖泊流场既包括水体流动速率,又含有方向信息,使用归一化傅里叶范数 F_n 来验证水动力模型对贡湖流场的模拟精度^[25]:

$$F_n = \left(\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |\vec{V}_{\text{sim}} - \vec{V}_{\text{obs}}|^2} \right) / \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |\vec{V}_{\text{obs}}|^2} \quad (1)$$

式中, \vec{V}_{sim} 和 \vec{V}_{obs} 分别是验证时段 $t(t=1, 2, \dots, T)$ 内模型对于湖流的模拟值和实测值, 当 F_n 值为 0 时表明模拟值与实测值完全吻合; 当模拟流速与实测流速大小相同, 但流向的夹角为 90 度时, F_n 的值则为 1.414。GH2、GH5、GH7、GH8、GH11、GH12、GH15、GH17(GH1、GH13 湖流部分数据缺失)的垂向平均水体模拟的 F_n 值分别为 0.55、0.61、1.06、1.11、0.94、0.91、0.98 和 0.72(图 7), 总体而言, 模型对湖流流速、流向模拟的精确度较好。GH8 位于贡湖南岸, 岸线曲折, 湖流在贡湖南岸易形成大小不一的环流, 导致南岸附近水域流速流向呈现出较高的空间差异, 因此 GH8 的模拟精度低于其他地区。

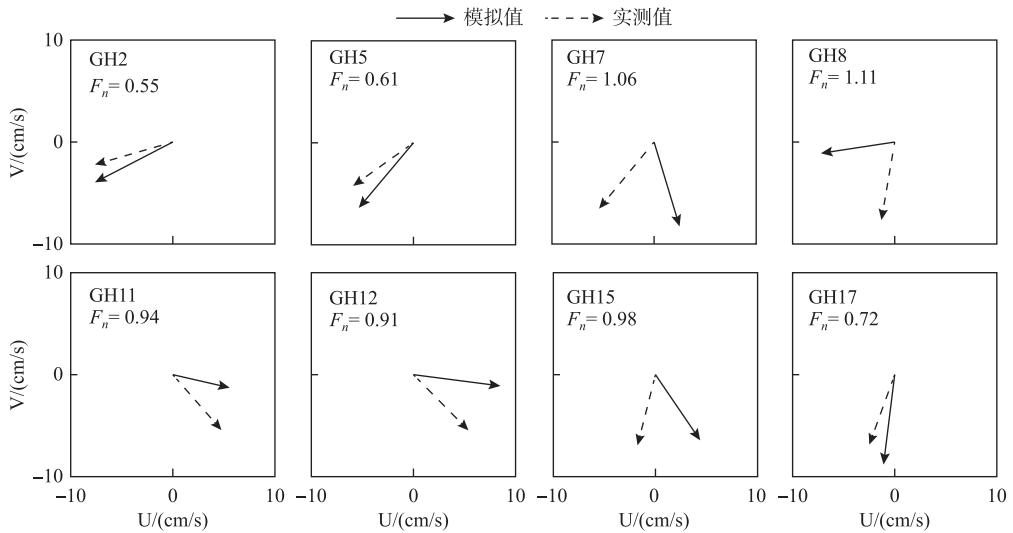


图 7 流速流向实测值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison of measured and simulated values of currents velocity and currents direction

太湖水体中的 Cl^- 浓度(40~50 mg/L)要显著高于长江水中的 Cl^- 浓度(15~25 mg/L), 因此长江水中较低浓度的 Cl^- 可示踪长江水在湖中的扩散范围及变化, 引水前对贡湖开展了一次 Cl^- 浓度监测, 作为模拟的初始条件, 边界条件为冬季引江期间风场及望虞河流量及 Cl^- 浓度。本文首次采用 Cl^- 来验证引水入湖后长江水的扩散规律(图 8), 并采用 Willmott 统计学方法来定量评价 Cl^- 监测结果和模拟结果的匹配程度。Willmott 统计学方法的 S 系数计算公式为:

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |M - D|^2}{\sum_{i=1}^n (|M - \bar{D}| + |D - \bar{D}|)^2} \quad (2)$$

式中, M 为模型计算结果; D 为实测值; \bar{D} 为实测平均值; n 为数据总量。根据计算的 S 值可将模型计算效率分为好($S > 0.65$)、较好($0.2 \leq S \leq 0.65$)和差($S < 0.2$)。

经计算, GH1~GH17 的 S 值介于 0.36~0.73 之间, 各监测点 Cl^- 浓度实测值与模拟值匹配程度较好。2 月 16 日之后模拟的 Cl^- 浓度与实测浓度存在一定差异(图 8), 可能是由于模型插值出的全湖风场与实际风场存在差异, 使得模拟的湖流运动轨迹与实际情况有误差。此外, 赵林林等^[26]对太湖水体垂向水温的研究表明, 冬季在特定的气象条件下会产生逆温层, 致使水体垂向温差较大, 水温差异会使水体理化性质不同, Cl^- 在不同水深处浓度可能存在差异, 因此推测 Cl^- 实测与模拟存在差异的原因可能是, 实测结果测得的是某一水深处的 Cl^- 浓度, 而模拟结果为垂向平均 Cl^- 浓度。总体而言, 模型模拟出的 Cl^- 运动规律与实测结果基本一致, 可较好地反映研究水域保守物质的时空分布特征, 可见 Cl^- 示踪法在水动力数学模型的验证中具有

较好的应用价值。

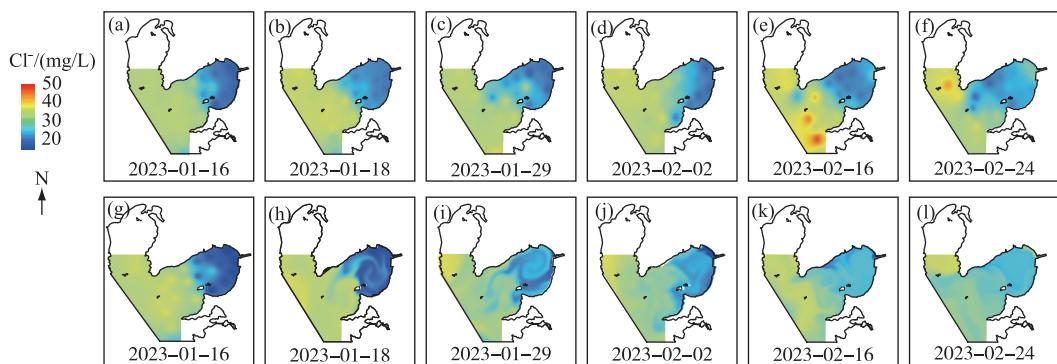


图 8 氯离子浓度实测值(a~f)与模拟值(g~l)对比

Fig.8 Comparison of measured value (a-f) and simulated value (g-l) of chloride ion concentration

2.4.2 贡湖流场模拟 采用二维水动力模型模拟多年平均风速 4.0 m/s ^[2]、8个风向、 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下贡湖垂向平均流场分布特征。图9显示了东北风、东南风、西南风和西北风4种典型风向下全湖垂向平均流场分布情况。在不同风向的驱动下,贡湖垂向平均流场空间分布存在显著差异,但贡湖形状比较规则,流场形态也有较强的规律性,不同风向下的流场分布特征可以归纳为以下4类:(1)顺时针方向流场,代表风向为西北风、北风,此类风场下贡湖水体首先流经贡湖西北岸,其次流过望虞河河口,最后沿东南岸流出贡湖;(2)逆时针方向流场,代表风向为东南风、南风,此类风场下贡湖水体首先流经贡湖湾东南岸,其次流过望虞河河口,最后沿西北岸流出贡湖;(3)中间进两岸出流场,代表风向为东北风、东风,此类风场下靠近太湖湖心的水体会沿贡湖湾轴心方向进入贡湖,随后来自太湖湖心的水体分为两部分,分别沿着湖湾西北岸和东南岸流出,最终流出贡湖湾;(4)中间出两岸进流场,代表风向为西南风、西风,此类风场下贡湖湾两岸的水体会流向望虞河河口,再沿湾心轴线流入太湖。

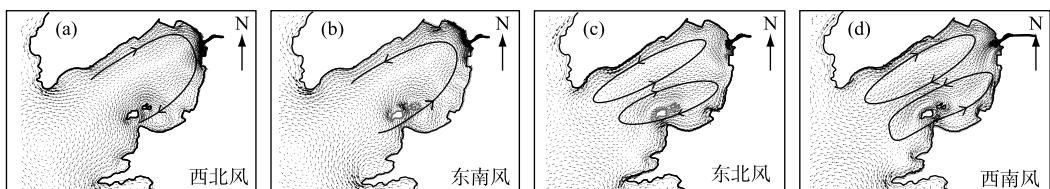


图 9 典型风向下贡湖流场运动规律

Fig.9 Characteristics of current field in Gonghu Bay under typical wind directions

2.4.3 不同流量下贡湖流速变化 “引江济太”工程一般在每年的5—6月前后和冬春季实施^[27]。采用二维水动力模型模拟5—6月东南风和冬季西北风2种典型风向(4.0 m/s)以及“引江济太”不同引水流量下贡湖垂向平均流速变化(图10)。西北风作用下,由于贡湖湾内顺时针环流的作用(图9a),引水后大部分水体会顺环流方向沿贡湖南岸流动,一定程度上加快了贡湖南部的流速,并且随着引水流量的增大,引水对南部水域流速的改善作用更加明显。东南风作用下,引水对贡湖北部的流速改善较为明显。西北风和东南风作用下,不同入湖流量对贡湖南部、北部的流速改善较为明显,改善幅度大都在20%之内,贡湖中轴线处的流速变化幅度可高达50%。以西北风为例,未引水条件下,贡湖中轴线南侧、北侧分别形成了由西向东和由东向西两股流向相反的湖流,两股水流相互摩擦,抵消动能,导致中轴线处流速明显低于其他水域(图9a);引水条件下,由于南部水域流速整体增加,导致中轴线处的流速变化率明显大于其他水域。

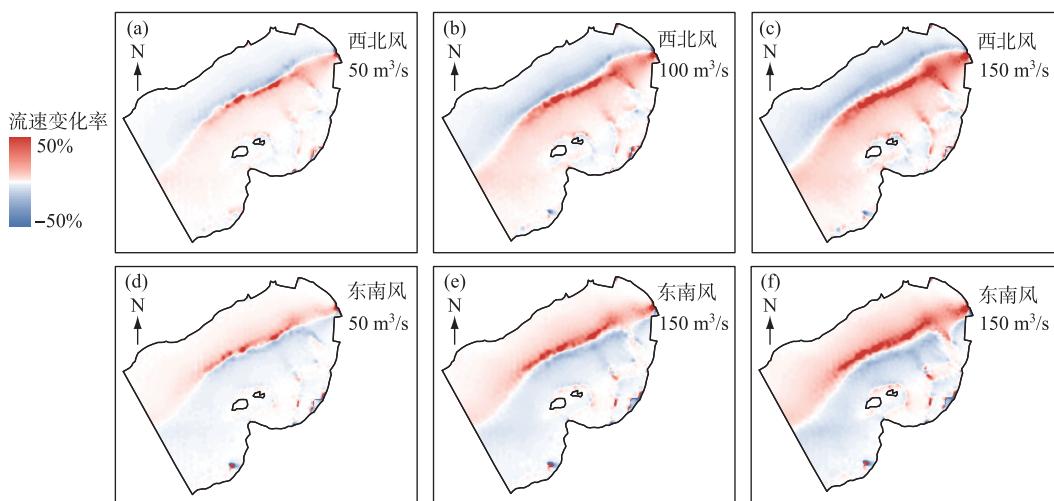


图 10 典型风场及不同流量下贡湖流速变化

Fig.10 The changes in current speed at Gonghu Bay under different discharges and typical wind fields

3 结论

望虞河来水及贡湖 Cl^- 浓度差异较大,且具备性质稳定、检测方法简单等特点,可作为“天然示踪剂”用于“引江济太”期间湖流观测及模拟,且进一步丰富了湖流模拟验证方法。夏季“引江济太”期间,长江水进入贡湖后,主要经“锡东水厂—金墅湾水厂—上山水厂”路线出贡湖,大太湖的湖水从南泉水厂方向进入贡湖;冬季“引江济太”期间,由于受前期调水的影响,贡湖 Cl^- 时空变化特征不如夏季明显。贡湖垂向平均流速总体较小,夏季平均流速为 6.3 cm/s ,冬季平均流速为 8.5 cm/s 。贡湖流速呈现出河口区和交界断面区大于中间过渡区的特征,其中河口区主要受“引江济太”影响,中间过渡区和交界断面区主要受风场驱动。贡湖垂向平均流场可分为顺时针、逆时针、中间进两岸出、中间出两岸进 4 种类型,“引江济太”对贡湖部分水域的流速改善幅度大都在 20% 以内,对中轴线处的流速改善作用更为明显。

4 参考文献

- [1] Feng T, Wang G, Wang PF *et al.* How physiological and physical processes contribute to the phenology of cyanobacterial blooms in large shallow lakes: A new Euler-Lagrangian coupled model. *Water Research*, 2018, **140**: 34-43. DOI: 10.1016/j.watres.2018.04.018.
- [2] Huang CL, Li X, Sun YY. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 22-31. DOI: 10.18307/2017.0103. [黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 22-31.]
- [3] Cai Y, Ke CQ, Shen XY. Variations in water level, area and volume of Hongze Lake, China from 2003 to 2018. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, **46**(6): 1511-1520. DOI: 10.1016/j.jglr.2020.08.024.
- [4] Yang QQ, Wu SQ, Dai JY *et al.* Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 34-43. DOI: 10.18307/2018.0104. [杨倩倩, 吴时强, 戴江玉等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 34-43.]
- [5] Li YP, Jalil A, Du W *et al.* Wind induced reverse flow and vertical profile characteristics in a semi-enclosed bay of large shallow Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2017, **102**: 224-233. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.02.022.
- [6] Zhang YH, Hu WP, Peng ZL *et al.* Practical measure research on the spatial characteristics of lake currents in Lake Hongze. *Chinese Journal of Hydrodynamics: Series A*, 2020, **35**(4): 541-549. [张怡辉, 胡维平, 彭兆亮等. 洪泽湖湖流空间特征的实测研究. 水动力学研究与进展: A 辑, 2020, **35**(4): 541-549.]
- [7] Ding WH, Qin BQ, Wu TF *et al.* Study on Taihu Lake's wind field and flow field under summer monsoon. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, **48**(2): 102-108. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.002. [丁文浩, 秦伯强, 吴挺峰等. 夏季风下的太湖

- 风场-流场野外观测研究. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 102-108.]
- [8] Peng ZL, Wang YS, Hu WP et al. Responses of wind-driven circulation to wind field and water level variations in Lake Hongze. *J Lake Sci*, 2021, 33(6): 1925-1939. DOI: 10.18307/2021.0626. [彭兆亮, 汪院生, 胡维平等. 洪泽湖风生流对风场和水位变化响应特征. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1925-1939.]
- [9] Yao J, Zhang Q, Li YL et al. The influence of uniform winds on hydrodynamics of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2016, 28(1): 225-236. DOI: 10.18307/2016.0126. [姚静, 张奇, 李云良等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响. 湖泊科学, 2016, 28(1): 225-236.]
- [10] Li YP, Acharya K, Yu ZB. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2): 325-334. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.11.024.
- [11] Ding WH, Li Y, Xu SK et al. Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6): 58-65. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.008. [丁文浩, 李云, 徐世凯等. 变化风场下太湖表层潮流特征及其对蓝藻迁移的影响. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 58-65.]
- [12] Chen G, Zhai Y, Wang XD et al. Particle tracing and numerical simulation of flow field in Hongze Lake based on GPS tracer experiment. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2021, 32(4): 142-148, 155. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.04.19. [陈钢, 翟月, 王旭丹等. 基于GPS的洪泽湖水流流场质点示踪及数值模拟. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 142-148, 155.]
- [13] Birkel C, Dunn SM, Tetzlaff D et al. Assessing the value of high-resolution isotope tracer data in the stepwise development of a lumped conceptual rainfall-runoff model. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2335-2348. DOI: 10.1002/hyp.7763.
- [14] Zhang P, Pei XZ, Cao CY et al. A novel tracer technique to quantify the lithogenic input flux of trace elements to Qinghai Lake. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 866314. DOI: 10.3389/feart.2022.866314.
- [15] Dai D, Zhang Y, Han XJ et al. Impact of sewage discharge on the water chemistry of Lake Taihu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(10): 3121-3130. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0043. [代丹, 张远, 韩雪娇等. 太湖流域污水排放对湖水天然水化学的影响. 环境科学学报, 35(10): 3121-3130.]
- [16] 马金标. 太湖及主要入湖水系天然水化学变化对比研究[学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [17] Ma JB, Deng YX, Xu GY et al. Long-term changes in major ion chemistry—Similarities and differences between inflow rivers and the lake in Taihu watershed, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(45): 100731-100742. DOI: 10.1007/s11356-023-29433-5.
- [18] Hu H. Research and analysis of chloride content determination method in water. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 29(1): 174-176. [胡灰. 水中氯化物含量测定方法研究分析. 现代食品科技, 2023, 29(1): 174-176.]
- [19] Wu TF, Qin BQ, Ding WH et al. Field observation of different wind-induced basin-scale current field dynamics in a large, polymictic, eutrophic lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6945-6961. DOI: 10.1029/2018jc014040.
- [20] Lv YZ, Li CM, Xiao ZW. Simulation research on influence process of wind-drift flow on water environment of Gonghu Bay. *Water Resources and Power*, 2022, 40(2): 39-42. [吕永政, 李翠梅, 肖昭文. 风生流对贡湖湾水环境的影响过程模拟研究. 水电能源科学, 2022, 40(2): 39-42.]
- [21] Yi YJ, Guo YM, Liu HX. Impacts of the Yangtze River Water Transfer Project on water quality of Lake Chaohu in different typical years. *J Lake Sci*, 2022, 34(6): 1901-1911. DOI: 10.18307/2022.0629. [易雨君, 郭玉明, 刘泓汐. 不同典型年“引江济巢”工程对巢湖水质的影响. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1901-1911.]
- [22] Yang B, Zhang YH. Properties of vertical distribution of velocity in dongtinghu lake. *Water Resources and Power*, 2020, 38(8): 33-36. [杨斌, 张英豪. 洞庭湖流速垂向分布特性. 水电能源科学, 2020, 38(8): 33-36.]
- [23] Shu YH, Gao CC. Numerical simulation of wind-driven current and pollutant transport and diffusion in Taihu Lake. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 121-127. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.019. [舒叶华, 高晨晨. 太湖风生流及污染物输移扩散数值模拟. 水资源保护, 2021, 37(2): 121-127.]
- [24] Wang JW, Li YP, Luo LC et al. Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6): 98-103, 116. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.016. [王建威, 李一平, 罗激葱等. 太湖风生流垂向切变规律的原位观测. 水资源保护, 2016, 32(6): 98-103, 116.]
- [25] Peng ZL, Hu WP, Zhang YH et al. Modelling the effects of joint operations of water transfer project and lake sluice on circulation and water quality of a large shallow lake. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125881. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125881.
- [26] Zhao LL, Zhu GW, Chen YF et al. Thermal stratification and its influence factors in a large-sized and shallow Lake Taihu. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 844-850. [赵林林, 朱广伟, 陈元芳等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素. 水科学进展, 2011, 22(6): 844-850.]
- [27] Wu HY, Gan YY, Jin K. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002–2021: Practices, achievements and future challenges. *J Lake Sci*, 2022, 34(5): 1393-1412. DOI: 10.18307/2022.0500. [吴浩云, 甘月云, 金科.“引江济太”20年: 工程实践、成效和未来挑战. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1393-1412.]