J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0144
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

基于高频自动监测的巢湖流场特征及风场驱动机制*

李宛星[1,2]，李世豪[1,2]，彭兆亮[1**]，刘　刚[3**]，胡维平[1]，张怡辉[1]，朱金格[1]

（1:中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135）

（2:中国科学院大学，北京 100049）

（3:安徽省巢湖管理局生态环境监测中心，合肥 238000）

摘　要：流场是湖泊能量与物质输移的核心驱动力，对污染物、藻类和鱼类等要素的分布具有决定性影响，明晰湖泊流场的时空变化特征对于深入理解湖泊生态环境问题成因和精准治理至关重要。本研究基于 2024 年巢湖 20 个自动监测站点的高频风场与流场同步观测数据，系统分析湖区风场与流场的时空分布特征，并探讨其响应关系及驱动机制。采用矢量分解、Pearson 相关分析及圆统计学方法，构建流速变异系数、流向离散系数与合成流速比等指标，对不同时间尺度下流场稳定性与动力特征进行了定量分析。结果表明：巢湖风场受东亚季风环流控制，呈现明显季节转换特征。2024 年全湖平均风速约 3.4　m/s，春季主导风向为东风，夏季转换为偏南风，秋季和冬季分别为东北风和北风。巢湖流场整体呈“西入东出”弱流格局，各站点平均流速介于 3.75~9.27　cm/s 之间，全湖平均为 5.18　cm/s。高流速区主要分布在出入湖河口与姥山岛两侧水流通道等水域，而西北部湖区、湖心及部分近岸区呈低流速状态。巢湖水体垂向流速仅为 m m/s 量级，垂向交换能力有限。流场在季节、月及日尺度上均表现出显著波动特征，春夏季全湖矢量平均流速分别为 0.92 和 0.89　cm/s，明显高于秋冬季的 0.53　cm/s。“引江济巢”调水期间兆河入湖区日均流速维持在 9.69~14.82　cm/s。8 个国控站点平均流速变异系数达 94.06%，流向离散系数为 73.5%~95.8%，平均合成流速比仅 0.28，表明巢湖流场具有“低流速、高波动、强离散”特征。风速与流速总体呈显著正相关（P<0.01），反映出风场是驱动巢湖流场变化的主要驱动力，但不同点位流场对风场的响应程度呈现显著差异，说明巢湖流场结构受湖盆形态、出入湖流量等多因素共同影响。研究结果可为浅水湖泊水动力调控、弱流滞留区识别及富营养化和藻类水华防控提供科学依据。

关键词：巢湖；湖泊流场；水动力；风场；时空分布特征

Current Characteristics and Wind-Forcing Mechanisms of Lake Chaohu Based on Automatic High-Frequency Monitoring*

Li Wanxing[1,2]，Li Shihao[1,2]，Peng Zhaoliang[1*]，Liu Gang[3]，Hu Weiping[1] & Zhang Yihui[1]

(1: *State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *P.R.China*)

(3: *Ecological and Environmental Monitoring Center of Anhui Chaohu Lake Administration, Hefei* 238000, *P.R.China*)

Abstract: Currents act as the core driver of energy and material transport in lake systems and dominate the distribution of pollutants, algae, and aquatic fish communities. Understanding the spatiotemporal variability of lake currents is critical for revealing the formation mechanisms of lake ecological and environmental problems and supporting the formulation of precise lake management strategies. Based on high-frequency synchronous observations of wind and current fields collected from 20 automatic monitoring stations in Lake Chaohu throughout 2024, this study systematically analyzes the spatiotemporal characteristics of wind and current fields and explores their

*2026-02-12 收稿；2026-05-19 收修改稿;2026-05-20 录用。
国家自然科学基金项目（42377451,42477094,42307074,42077426）和巢湖生物资源调查项目及生态修复示范工程项目（2021BFFBZ01571）联合资助。
**通讯作者；E-mail：zlpeng@niglas.ac.cn；345884754@qq.com

response relationships and internal driving mechanisms. This study adopts vector decomposition, Pearson correlation analysis, and circular statistical methods to establish multiple evaluation indices, including the coefficient of variation of current velocity, directional dispersion coefficient, and composite current velocity ratio, and quantitatively assesses the stability and dynamic characteristics of lake currents at multiple temporal scales. The results show that the wind field of Lake Chaohu is governed by the East Asian monsoon circulation and presents obvious seasonal transition features. In 2024, the average wind speed of the entire lake basin was approximately 3.4 m/s. Easterly winds dominated in spring, southerly winds prevailed in summer, northeasterly winds occurred frequently in autumn, and northerly winds were predominant in winter. The current field of Lake Chaohu shows a weak "west-in–east-out" transport pattern. The mean current velocity of individual monitoring stations ranged from 3.75 to 9.27 cm/s, with an entire-basin average of 5.18 cm/s. High-velocity current zones are mainly distributed in river inflow and outflow estuaries, as well as the water channels on both sides of Laoshan Island. In contrast, the northwestern lake area, the central lake region, and partial nearshore zones maintain low-velocity current conditions. The vertical current velocity of Lake Chaohu is only at the millimeter per second level, which reflects a weak vertical water exchange capacity. The lake current field exhibits obvious fluctuations at seasonal, monthly, and daily temporal scales. The vector-averaged current velocity of the whole lake basin was 0.92 cm/s in spring and 0.89 cm/s in summer, both distinctly higher than the average value of 0.53 cm/s in autumn and winter. During the operation period of the "Yangtze River-to-Lake Chaohu Water Diversion Project", the daily mean current velocity in the Zhao River inflow area stayed between 9.69 and 14.82 cm/s. For eight national monitoring stations, the mean coefficient of variation of current velocity was 94.06%, the directional dispersion coefficient ranged from 73.5% to 95.8%, and the mean composite current velocity ratio was only 0.28. These index values indicate that the current field of Lake Chaohu has typical characteristics of "low velocity, high variability, and strong directional dispersion". Wind speed and current velocity showed a significant overall positive correlation ($p < 0.01$), demonstrating that wind forcing is the primary factor controlling the temporal and spatial variations of lake currents in Lake Chaohu. However, the response intensity of lake currents to wind forcing varied greatly among different sampling sites. This difference indicates that the current field structure of Lake Chaohu is co-regulated by multiple factors, including lake basin topography and inflow and outflow discharge conditions. The research findings provide a reliable scientific basis for hydrodynamic regulation, identification of low-flow retention areas, and prevention and control of eutrophication and algal bloom events in shallow lake ecosystems.

Keywords: Lake Chaohu; lake flow field; hydrodynamics; wind field; spatiotemporal distribution characteristics

湖泊水动力是湖泊生态系统能量与物质循环的核心驱动力[1-2]。作为表征水体运动的重要物理参量，流场不仅决定入湖水体、污染物和湖内悬浮物、溶解质以及藻类等物质的迁移扩散过程[3-6]，还对藻类、大型水生植物和鱼类等生态要素生长和分布具有决定性影响[7-10]。相关研究成果表明，大型浅水湖泊流场受湖盆结构、水位、湖面风场和出入湖流量等多要素共同作用，呈现出快速的时空变化[11-20]。其中风场作为主要的外强迫因子，通过风应力直接驱动表层水体向下风向运动，垂向上引发流速切变，中下水层在粘滞力作用下产生相对于湖底的运动形成风生流，进而影响能量和物质在不同水层的迁移和交换格局[21-24]。

国内外针对湖泊流场已开展了大量研究，重点聚焦于流场结构特征识别、动力驱动机制解析及其生态环境效应评估[25-27]。通过现场监测、数值模拟、物模试验与遥感技术等方法，分析流场空间分布、风生流、吞吐流和密度流组成、热分层与垂向交换及风浪耦合等过程[28-30]。针对伊利湖、贝加尔湖等典型大型湖泊的研究揭示了风场变化、湖底地形及岸线形态对环流结构的综合影响[31-35]。针对太湖、鄱阳湖的研究表明水利工程调度及水位变化可通过改变水体交换条件与流速分布，引发湖泊换水周期及物质输运效率的改变[36-41]。同时，极端天气下风场和风浪的强烈扰动会在短时间尺度内打破常规流场结构，重构水体理化参数的空间分布格局[42-43]。

方法层面上，数值模拟与现场观测是当前研究湖泊流场的主要技术路径。以 EFDC、MIKE 及 Delft3D 等为代表的水动力模型在流场模拟及情景分析中得到广泛应用，为全面揭示和理解湖泊流场结构、变化特征和主要驱动要素提供了重要手段[44-47]。但受限于地形概化、计算单元分辨率、应力参数率定及外部函数精度和分辨率等限制，其对复杂流场结构，尤其是局地瞬态过程的刻画能力仍存在不确定性[48-49]。相较而言，现场观测能够更加直接认识水体真实流动状态。但传统流场观测手段多依赖船载走航或定点锚系，受

湖区观测条件限制，普遍存在时间连续性不足与空间覆盖有限等问题，难以支撑大尺度、多点位的同步精细化分析。作为影响湖泊流场结构与演化的关键因素，湖面风场特征的刻画同样存在明显局限。目前风场研究多依赖陆基观测或数值模拟，与湖区实际情况通常差异较大，目前针对大型湖泊流场及风场多点位精细化同步观测和研究仍存在空白[50]。近年来自动化观测技术的迅速发展，解决了传统人工观测受天气影响大等问题，为破解湖泊流场和风场的多时空尺度过程捕捉和协同演变规律研究难题提供了机遇。

巢湖为我国第五大淡水湖，位于皖江城市带和合肥经济圈核心区，是长江下游重要的生态屏障[51]。近年来，巢湖水质总体持续向好，但由于多年污染的累积以及湖区生态退化导致的消纳能力不足，仍存在水质稳定性不足、藻类水华暴发趋势尚未根本扭转等生态环境问题[52]。本研究基于 2024 年巢湖湖区 20 个监测站点流场和湖面风场的高频同步监测数据，重点研究风速、风向及三维流速的时空变化特征，分析风场与流场的协变关系并探讨其动力响应机制，为巢湖水环境演变机理认识及科学调控提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

巢湖（31°25′~31°43′N，117°16′~117°51′E）位于安徽省中部，属亚热带季风气候，水位 9.0 m 时水域面积约 780 km^2，平均水深 3.4 m，属典型大型浅水湖泊。巢湖湖盆地形平坦，西岸岬角等局部区域受人类活动影响，岸线形态较为复杂。巢湖流域面积为 13544 km^2，入湖河流包括南淝河、派河、杭埠河等 39 条，其中杭埠河、南淝河、白石天河等西部河流贡献了 75%以上的入湖水量，湖水经巢湖闸调控后通过裕溪河汇入长江（图 1）。合肥与巢湖国家气象基本站 1953 年以来监测数据显示，巢湖流域年均气温为 16.1 ℃，年均降水量约 1003.7~1071.9 mm。

1.2 数据收集与处理

本研究系统收集了 2024 年巢湖南淝河入湖区、西湖心、中庙等 20 个站点（图 1）风场与流场的同步高频监测数据。湖面风场采用多参数气象监测仪 WXT-536 进行连续监测，其性能满足 IEC60945 海事标准要求。考虑到巢湖水位存在较大幅度波动，仪器统一布设于巢湖常水位以上 8 m 高度的平台上，以便于保持不同湖区数据分析和应用的一致性。流场利用多普勒流速剖面仪 XR-1500 坐底式监测。此外，为进一步厘清巢湖垂向分层水体流动特征，选取西湖心、派河入湖区及中庙等典型站点，于 2024 年 12 月 11 日—13 日开展了 3 次流场剖面结构连续观测。风场与流场监测设备类型、主要参数及技术指标见表 1。

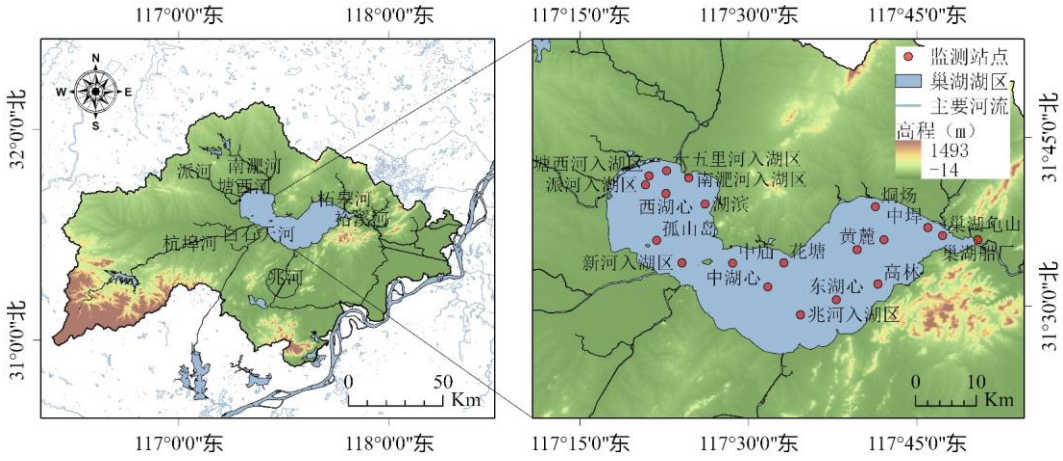

图 1　巢湖流域地形及湖区自动监测站分布

Fig.1 Topography of the Lake Chaohu Basin and Distribution of Automatic Monitoring Stations

数据处理过程中，首先采用标准差判别及时空一致性分析方法识别并剔除异常值，以消除仪器故障及突发干扰带来的影响。其次对原始数据进行时间序列对齐，并对缺测数据进行插值处理，从而构建连续、

完整的数据序列。在此基础上，利用 Excel、Matlab R2023b 及 Python 等工具对风速与流速进行矢量分解，将其转换为东西向（U 分量）和南北向（V 分量）两个正交分量，并分别在日、月及年尺度上进行统计分析。其中，流场的流向为水流的去向，以东向为 0°，逆时针计角；风场则采用标准气象坐标，风向为风的来向，以北风为 0°，顺时针计角。进一步通过线性拟合与 Pearson 相关分析方法，对风场与流场之间的响应关系进行定量评估及显著性检验。

表 1 监测设备及观测参数

Tab.1 Monitoring Equipment and Observed Parameters

监测要素	仪器名称	仪器型号	主要观测参数	分辨率	精度	频率
湖面风场	多参数气象监测仪	WXT-536	风速、风向等	0.1 m/s	10 m/s 时±3%	5min
垂向平均流场	多普勒流速剖面仪	XR-1500	垂向平均流速、流向	0.01 cm/s	±2%	1min
三维流速剖面	多普勒流速剖面仪	HydroSurveyor	分层及垂向流速、流向	0.01 cm/s	±0.25%	1s

流速与流向的统计特征参数计算如下：

（1）流速变异系数（*CV*）用于表征水体流速在时间尺度上的波动幅度，其值为流速标准差与绝对平均流速的相对比值，表达式为：

$$CV=\frac{\sqrt{\frac{1}{n\text{-}1}\sum(v_i\text{-}\bar{v})^2}}{\frac{1}{n}\sum v_i}\times 100\% \tag{1}$$

式中，v_i为观测期内第 *i* 天的日均流速（cm/s）；$\bar{v}$为观测期内的绝对平均流速（cm/s）；*n* 为总观测天数。

（2）基于圆统计学（Circular Statistics）原理，利用流向标准差（σ）和离散系数（*R*）表征水体流向的变化特征：

$$\sigma=\sqrt{\text{-}2ln(\sqrt{(\frac{1}{n}\sum cos\theta_i)^2+(\frac{1}{n}\sum sin\theta_i)^2})} \tag{2}$$

$$R=(1\text{-}\sqrt{(\frac{1}{n}\sum cos\theta_i)^2+(\frac{1}{n}\sum sin\theta_i)^2})\times 100\% \tag{3}$$

式中，θ_i为观测期内第 *i* 天的日均流向（°）；*n* 为总观测天数。

（3）合成流速比（*Ur*）即矢量平均流速与标量平均流速之比。该指标综合反应了流场方向的集散性与流速大小的波动性。*Ur* 值越接近 1，表明流向越稳定；*Ur* 值越接近 0，则表明流速脉动剧烈或水流多呈往复、旋转交替状态，其计算公式为：

$$Ur=\frac{\sqrt{(\frac{1}{n}\sum v_i cos\theta_i)^2+(\frac{1}{n}\sum v_i sin\theta_i)^2}}{\frac{1}{n}\sum v_i} \tag{4}$$

式中，v_i与θ_i分别为观测期内第 *i* 天的日均流速（ cm/s）与流向（°）；*n* 为总观测天数。

2 结果

2.1 巢湖湖区风场时空分布特征

风场作为湖泊流场变化的关键驱动因素之一，其时空变化特征对于理解巢湖流场变化规律至关重要。从各站点年均风速风向统计结果来看（图 2），全湖矢量平均风速约 1.0 m/s，绝对风速（不考虑风向差异）约为 3.4 m/s，大多数站点为东北风向，受湖区岛屿和沿岸地形等要素影响，部分站点如孤山岛等为东南风向。从季度和月度尺度来看，各点位风速风向存在明显变化。2024 年巢湖春季（3—5 月）东风占比最高，

占比分别为 10.4%、16.8%、14.4%，各站点季均风速介于 0.6~2.1 m/s。夏季（6—8 月）巢湖风向整体由春季的东风转向东南及南风，且风速较春季有所增强，季均风速 0.9~2.4 m/s。7 月份南风占比超过 20.0%，同时 5 级以上（风速≥8.0 m/s）劲风出现频率高达 12.0%，明显高于其他月份。秋季（9—11 月）巢湖季均风速 1.5~3.1 m/s，东风、北风、东北风出现频率最高，9 月、10 月、11 月三种风向总占比分别为 64.4%、60.7%、57.3%。冬季（12 月及 1—2 月）巢湖风场以北风为主，季均风速 0.9~1.9 m/s，1 月、2 月日均风速区间 60%以上为 2~6 m/s，12 月平均风速较小，3 级以下（风速≤5.4 m/s）微风占比超过 75%。巢湖流域风场的这一变化过程与大气环流的季节性调整一致[53]。

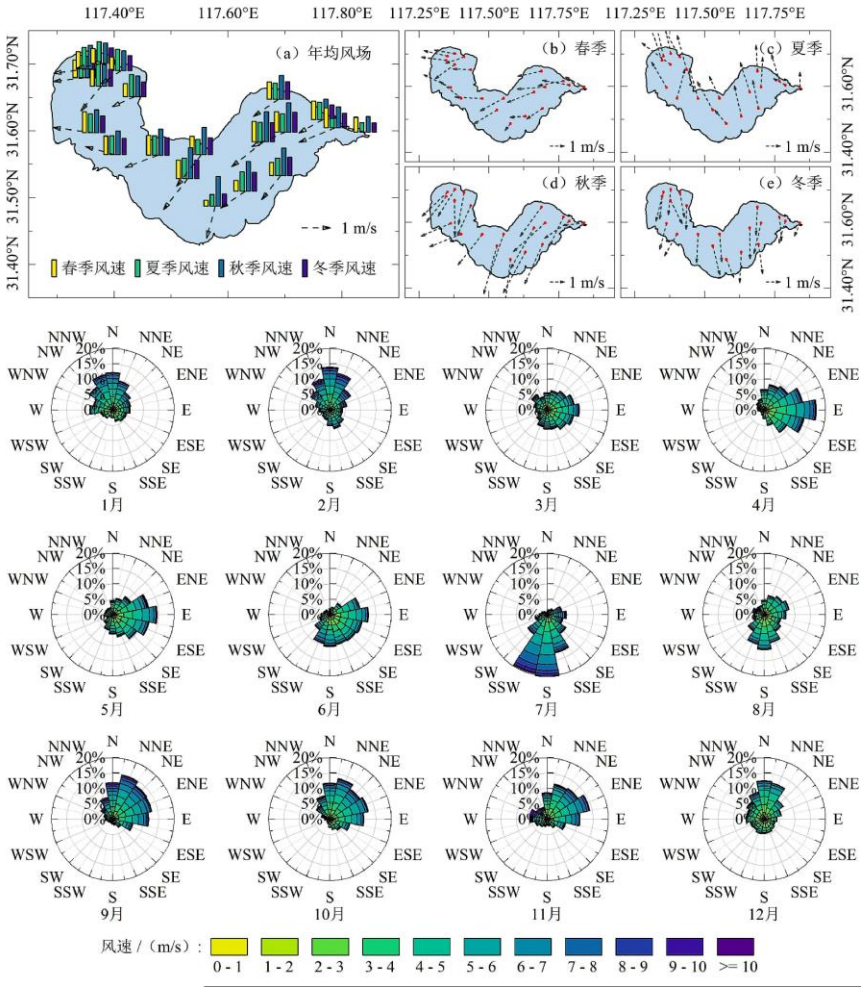

图 2 2024 年巢湖风场时空分布特征

Fig.2 Spatiotemporal Distribution Characteristics of the Wind Field Over Lake Chaohu in 2024

2.2 巢湖流场空间分布特征

2.2.1 巢湖流场总体分布格局　2024 年 20 个监测站点监测结果表明，巢湖水体流向和流速呈现出明显的空间异质性（图 3）。考虑点位流向差异的全湖矢量平均流速约 0.35 cm/s，不考虑流向差异的绝对平均流速则介于 3.75~9.27 cm/s，全湖平均为 5.18 cm/s。流速高于 5.00 cm/s 的水域主要分布在出入湖河口区域及姥山岛两侧水道，中东部湖区流速相对较低，平均流速低于 4.50 cm/s。从水体流向来看，巢湖水体整体呈现出由西到东的流动格局，但在局部水域表现出复杂流向或环流特征。位于西北部湖湾处的 1~6 站点流场受入湖流量和岸线形态影响较大[54]，流向较为复杂，形成一个较大的顺时针环流。从西部湖区至东部湖区，

流向逐渐由东南向东北转变。位于巢湖闸附近的巢湖船厂站点受水体出湖影响，流向稳定朝向东南。东北部湖区的 10、15~17 等站点流向复杂，表现出局部环流特征或反向流特征。

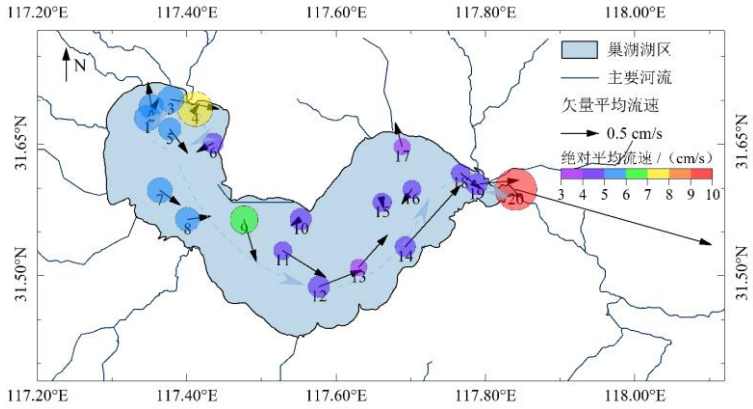

图 3　2024 年巢湖流场的总体结构特征

Fig.3 Overall Structural Characteristics of the Flow Field in Lake Chaohu in 2024

2.2.2 点位流向、流速频率统计　从各站点日均流向和流速的分布情况来看（图 4），西北部湖湾（站点 1~6）与近岸区（站点 9、10 等）流向较不稳定，方向离散性高，说明受地形、风场和入湖流量多要素影响强烈，属于典型的滞流或涡旋易发区[55]。靠近入湖河口区的站点（如站点 7、8 等）流向与入湖河流的流向较为吻合，但也受到巢湖整体主流动路径的影响导致流向分化。位于东部出湖口的 19~20 站点流向较为稳定，主要为南向和东南向出流。各站点日均流速多集中于 0.50~2.00 cm/s 区间，其中 1.00~1.50 cm/s 流速段占比最高。受巢湖闸湖水下泄影响，巢湖闸西部的站点 20 流速大于 3.00 cm/s 频率占比达到 10.5%，明显高于其他水域。除此之外，仅有站点 7、8 流速大于 2.50 cm/s 的累计频率超 10%，大部分站点流速高于 1.00 cm/s 的累计频率不足 40%，尤其西北部、东北部湾区及湖心等多个站点超过 50%的时段流速低于 0.50 cm/s，说明巢湖全年多数时段处于缓流状态。

2.2.3 流速垂向变化分析　为揭示巢湖不同水深处水体流动特征，选取派河入湖区、西湖心及中庙 3 个典型点位，分别代表河口区、开阔湖心区及岛屿近岸等关键水文环境类型，分析其观测期内平均东向流速（Ve）、北向流速（Vn）与垂向速度（Vd）随水深变化的分布特征（图 5）。可以看出，巢湖虽然为浅水湖泊，其垂向流速结构仍呈现一定分异特征。三个点位东向流速整体以负值为主，且流速从表层至底层逐渐缓慢增大，其中派河入湖区流速相对较大，平均值约为 - 2.76 cm/s，西湖心与中庙点位流速相对较小，平均值分别为 - 1.37 cm/s 和 - 1.48 cm/s。北向流速明显低于东向分量，随着水深增加流向出现逐渐偏转和反向的情况，派河入湖区与中庙点位以南向流动为主，平均流速分别为 - 0.41 cm/s 和 - 0.11 cm/s，而西湖心点位则以北向流动居多，平均流速约为 0.19 cm/s。垂向流速整体处于 m m/s 量级，远小于水平方向流速，且随水深增加呈减弱趋势，表明研究区水体运动以水平输运为主，垂向交换相对较弱。

2.3 巢湖流场时间变化特征

2.3.1 季节和月度变化特征　巢湖流场呈现显著季节差异（图 6）。春、夏季全湖矢量平均流速分别为 0.92 cm/s 和 0.89 cm/s，秋、冬季降至 0.53 cm/s。空间上，出入湖河口等水域流速较高，流向较为稳定，而东西湖心与岛屿近岸带流速较缓，流向不稳定。受岸线形态、风场及入湖河流共同影响，西部湖区各站点流向差异较大，东部湖区则形成大尺度的逆时针环流，高林与巢湖船厂流速达 1.94 cm/s 和 2.05 cm/s，而中埠等不足 0.40 cm/s。夏季在较强的风场作用下中东部水体流速较高，巢湖船厂流速升至 6.03 cm/s。秋季大部分站点流速明显回落，流速高值出现在南淝河入湖区与高林站。冬季全湖流速总体进一步降低，但受“引江济巢”补水影响[56]，新河、兆河入湖区等部分站点流速有所增加，分别达 1.15 cm/s 和 1.28 cm/s，而其他站点大部分低于 0.30 cm/s。

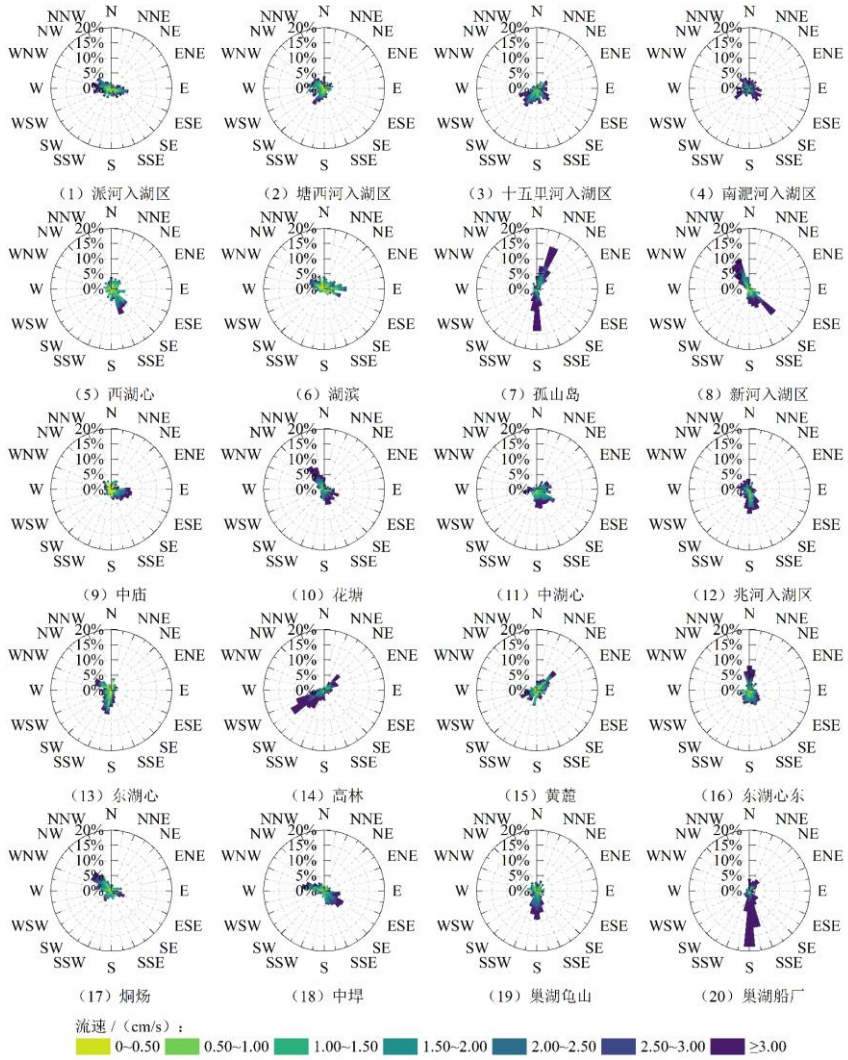

图 4　2024 年巢湖 20 个自动监测站点流场玫瑰图

Fig.4 Mean Flow Field Rose Diagrams at 20 Automatic Monitoring Stations in Lake Chaohu in 2024

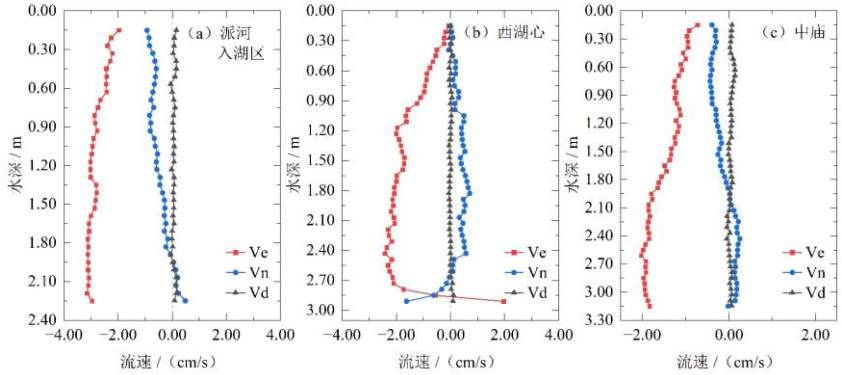

图 5　巢湖典型点位水体东向、北向和垂向流速随水深变化曲线

Fig.5 Vertical Profiles of Eastward, Northward, and Vertical Flow Velocity with Water Depth at Representative Sites in Lake Chaohu

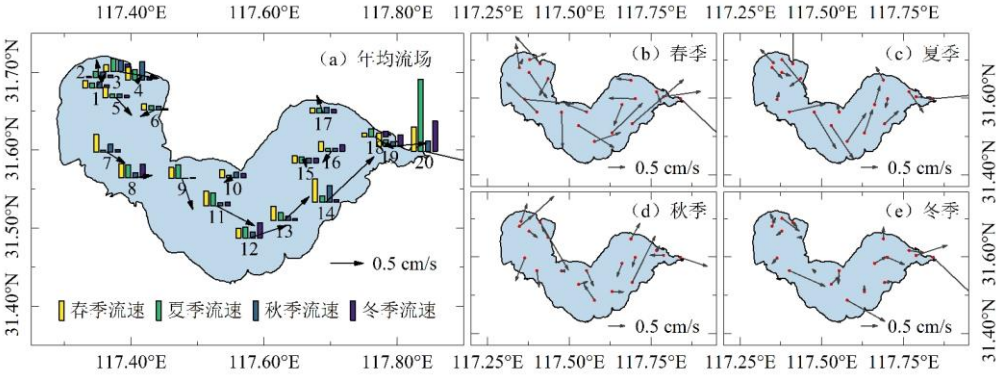

图 6　2024 年巢湖流场的季节变化特征

Fig.6 Seasonal Variation Characteristics of the Flow Field in Lake Chaohu in 2024

月尺度流场分析结果表明（图 7），2—8 月巢湖整体流速较高，多数站点超 1.00 cm/s，而 9—12 月明显回落。南淝河、新河入湖区及巢湖船厂等站点在 3—9 月持续维持较高流速。相比之下，湖心区及部分近岸带流速长期维持较低水平，表明开阔水域内部存在一定程度的弱环流或准静稳态结构[57]。南淝河、新河及兆河等入湖区流向波动最为明显，反映出河道来水、风场扰动及复杂地形之间存在显著耦合作用。其中，兆河入湖区在 11—12 月全湖整体流速偏低背景下仍维持较高流速，这与 2024 年“引江济巢”生态补水有关。相比之下，西湖心、中庙及黄麓等区域流向变化相对平缓，其原因主要与湖心区较长有效吹程及相对均一的地形条件有关[58]。巢湖龟山和船厂受巢湖闸调控影响，1—9 月呈现长期的中高流速特征，但在 10 月之后流速快速衰减。

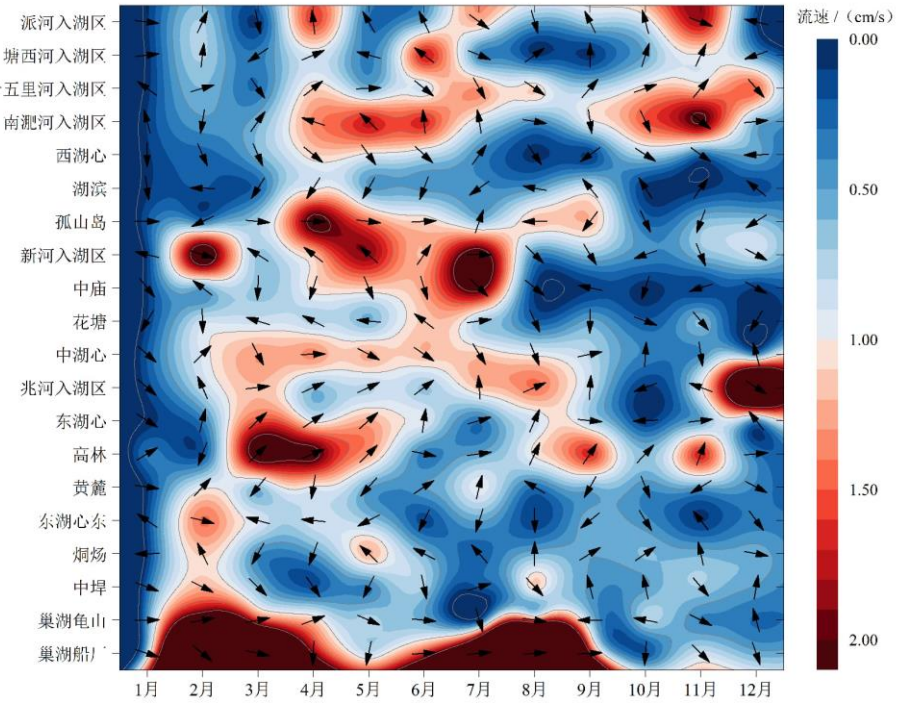

图 7　2024 年巢湖流场月度变化特征

Fig.7 Monthly Variation Characteristics of the Flow Field in Lake Chaohu in 2024

2.3.2 流场日尺度变化特征　为深入分析巢湖流场在更高时间分辨率上的变化特征，选取西湖心、湖滨、新河入湖区、中庙、兆河入湖区、东湖心、黄麓及巢湖龟山 8 个国控监测站点，计算其主要统计量（表 2）并绘制了全年日均流场矢量图（图 8）。结果表明，各站点平均流速为 1.54 cm/s，新河入湖区与兆河入湖区流速较高，分别为 2.37 cm/s 和 2.58 cm/s，反映出入湖河口区域较强的动力作用，而东西湖心等开阔水域流速相对较低。8 个站点流速标准差与变异系数整体较大，平均标准差为 1.46 cm/s，平均变异系数为 94.06%，中庙与新河入湖区变异系数超过 100%，表明流速在日尺度上波动显著。流向统计结果显示，各站点流向标准差在 93.4°～144.5°之间，流向离散系数为 73.5%～95.8%，说明巢湖流向在短时间尺度上呈现出更强的离散性与频繁摆动特征。其中，新河入湖区与黄麓站点流向离散程度最高，分别达到 95.8%和 91.8%，而东湖心与兆河入湖区相对较低，流向稳定性较强。8 个站点平均合成流速比为 0.28，其中黄麓站点最低，仅为 0.05，表明其流场结构最为复杂。总体而言，巢湖流场在日尺度上总体表现出“低流速-高波动-强离散”的典型特征，尤其在河口区及复杂地形区域，流场受径流输入、风场变化及岸线等多因素共同作用[59]，呈现出显著的时空不稳定性。

表 2　2024 年巢湖日均流场变化特征值

Tab.2 Characteristics of Daily Mean Flow Field Variations in Lake Chaohu in 2024

国控站点	绝对平均流速/（ cm/s）	流速标准差/（ cm/s）	流速变异系数/（%）	流向标准差/（°）	流向离散系数/（%）	合成流速比
西湖心	1.05	0.92	88.3	101.2	79.0	0.34
湖滨	0.92	0.85	92.6	98.4	77.1	0.26
新河入湖区	2.37	2.48	104.7	144.5	95.8	0.13
中庙	1.22	1.40	115.5	102.5	79.8	0.41
兆河入湖区	2.58	2.55	99.0	96.6	75.8	0.23
东湖心	1.29	1.23	95.4	93.4	73.5	0.41
黄麓	1.48	1.22	82.3	128.2	91.8	0.05
巢湖龟山	1.41	1.06	74.7	100.2	78.3	0.40

图 8 进一步显示了巢湖 8 个国控站点日均流速和流向的变化特征。2024 年最大日均流速出现在 7 月 3 日新河入湖区站点，达 19.07 cm/s，最小日均流速则出现在 11 月 7 日中庙站点，仅 0.01 cm/s。受“引江济巢”调水工程后续影响，兆河入湖区站点在 12 月 20 日至 31 日期间流速明显升高，日均流速介于 9.69～14.82 cm/s 之间，呈现阶段性增强特征。在 4 月中旬、7 月上旬及 10 月下旬等时段，多个站点流向出现明显逆转，且伴随流速同步增强，该现象与强降雨、短时强风等极端气象事件密切相关[60]。

3 讨论

3.1 巢湖水体流速对风速变化的响应特征及机制

2024 年巢湖风场总体与区域典型季风气候特征相符合，该年度风场过程具有较好的代表性。在此背景下，湖区流场对风场变化所呈现出的阶段性响应，可视为浅水湖泊风生动力过程的典型体现。为进一步识别风速对流速的驱动强度及其空间差异，本研究基于 20 个监测站点高频观测数据开展风速-流速耦合分析，并构建风速-流速二维散点密度关系（图 9）。结果表明，各站点风速与流速总体呈显著正相关关系（P<0.01），但相关强度存在明显空间分异，反映出风应力向湖流动能转换效率具有显著非均一性。风速驱动效应较强的区域主要为南淝河入湖区（r=0.377）、巢湖船厂（r=0.249）及中湖心（r=0.209），该类区域风场动量输入效率较高，更易形成稳定的定向输运过程。

从散点密度分布特征来看，多数观测数据集中于中低风速（2~6 m/s）与低流速（0~6.00 cm/s）区间，说明巢湖整体仍属于典型弱流浅水湖泊。但随着风速增强，高流速事件出现概率明显增加，散点分布逐渐由集中态向“扇形”扩展，体现出风生流响应的非线性增强特征。该现象表明，浅水湖泊风流耦合过程本

质上受到风应力输入与底床摩擦耗散之间动态平衡的制约：在低风速条件下，底床摩擦对流体动能耗散占主导地位，流速增长有限；而当风速持续增强时，风应力驱动作用显著提高，但底床摩擦与紊动耗散亦同步增强，导致流速增幅逐渐减缓，并最终表现出一定的响应饱和特征[61-62]。这一结果进一步说明，巢湖风生流形成过程并非简单线性响应，而是多尺度动力过程共同作用下的耦合结果。

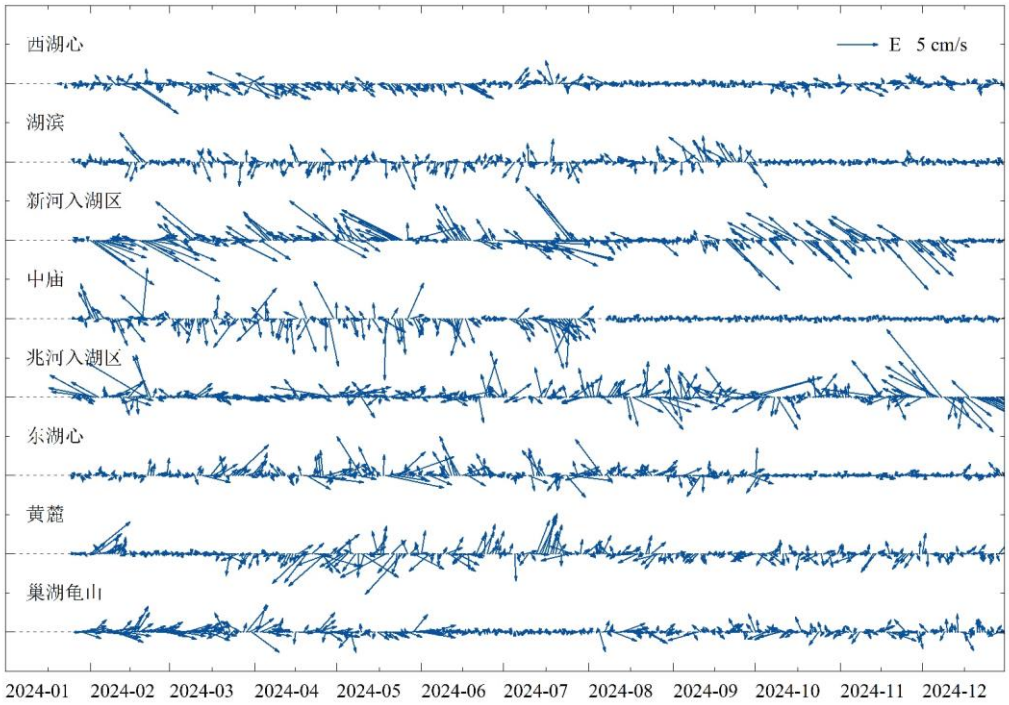

图 8　2024 年巢湖日均流场矢量图

Fig.8 Vector Diagrams of Daily Mean Flow Field in Lake Chaohu in 2024

3.2 巢湖流场对风场变化的响应机制分析

对比逐月风场与流场的对应关系（图 10）可以看出，不同时空下风流响应关系存在显著差异，反映出风应力、径流输入及湖盆边界条件等共同作用下的复合动力特征。总体来看，湖流虽整体表现出随风响应趋势，但不同区域与季节的主控动力存在明显差异。春季在风速较低的东风作用下，水体仍总体呈现“自西向东”的流动格局，说明吞吐流是维持巢湖水体基本流动格局的关键组成，风场由于其快速变化，在短时间范围内对流场结构具有明显的调制作用。夏季风速增强后，中湖区及东湖区风流响应同步性提高，风生流对上层水体流动的驱动作用明显增强，而河口区则在风场、出入湖水体较强的压强梯度力等多因素共同作用下，易形成更为复杂的流场结构。由于巢湖总体呈东西走向，秋冬季在较强的偏北风作用下，易在南部湖区形成较强的沿岸流，表明边界条件会放大风场扰动的局地响应[63]。

基于各站点风场与流场矢量点积相似度分析结果可知，风场对流场的驱动作用具有明显的空间异质性与月际波动特征。新河入湖区、南淝河入湖区及黄麓等站点在部分月份表现出较强正相关，其中新河入湖区 7 月达到 0.0483 m^2/s^2，流场对风场变化响应呈现出极强的一致性。而十五里河入湖区、中湖心及高林等站点则多表现为负相关，其中高林 9 月降至 - 0.0568 m^2/s^2。巢湖船厂 7—8 月由正相关迅速转变为 9 月的强负相关，也表明风场驱动力具有较强阶段性与不稳定性。

不同区域风流耦合关系的差异，也与湖盆形态及下垫面条件密切相关[64]。湖心区吹程较长，风应力能够较有效地传递至表层水体，流场响应同步性较强[63]。河口区则表现出明显的风流复合驱动特征，汛期径流增强阶段，即使风速较低，局地仍可能维持较高流速。相比之下，姥山岛等岛屿邻近区及复杂岸线区域

受绕流、岸线反射及底床摩擦等影响，局地环流更为明显，从而削弱了大尺度风场与局地流场之间的直接对应关系[65]。整体而言，巢湖风流关系并不存在统一稳定的响应模式，其动力结构受到风场变化、径流过程及局地边界条件的共同调控，并表现出明显的区域差异与季节变化特征[66]。

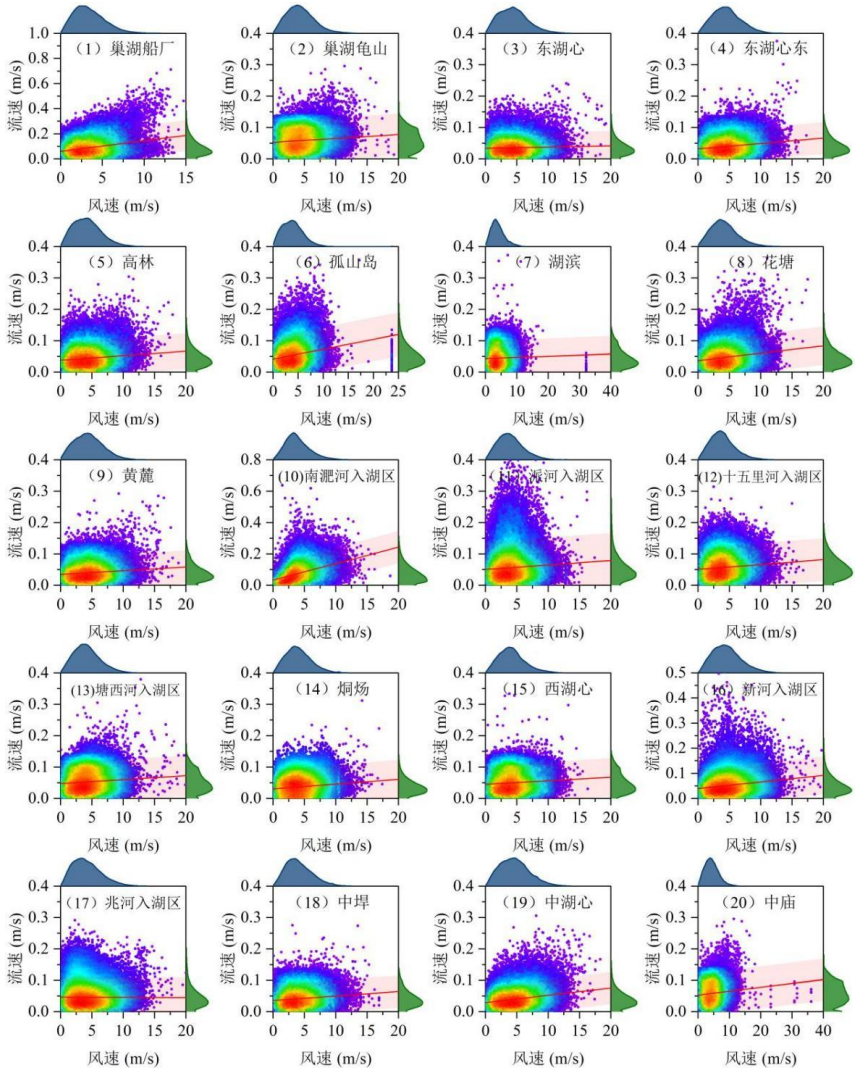

图 9　巢湖 20 个自动监测站点风速-流速二维散点密度图

Fig.9 2D Scatter Density Plot of Wind Velocity and Flow Velocity at 20 Automatic Monitoring Stations in Lake Chaohu

3.3 对于巢湖水环境管理的启示

从本文研究结果来看，巢湖水体总体呈“低流速-高波动-强离散”的缓流状态，超过 50%的时段近半站点矢量合成流速低于 0.50 cm/s，其中西北部和东北部湖湾及湖心区是典型的弱流滞留易发区。同时，风应力对湖流动能的驱动效率也呈现出较强的空间异质性，在南淝河入湖区、中湖心等水域响应较强，而在姥山岛邻近区及复杂岸线水域，受绕流、底床摩擦及岸线等因素影响，局地环流发育明显，削弱了风场与流场的直接耦合关系。总体来看，风流耦合作用在巢湖表现出强烈的空间异质性与非线性响应特征。当前，随着“引江济巢”调水工程建成运行和环湖闸坝等水利工程的逐步完善，巢湖已具备较强的水动力调控能力。因此，在水利工程调度中可实施分区精准调控措施，开展巢湖闸、兆河闸等控湖工程的优化调控，对西北部、东北部等弱流滞留区，可结合夏季风速增强窗口期，利用风生流的上层驱动效应，调控形成定向

补水路径，打破滞流结构，避免污染物集聚造成的局部水域水质异常。在西部入湖河道河口区及岛屿近岸等环流发育区，可建设水下潜堤等水动力优化工程，避免因局部地形放大产生的绕流滞留效应。此外，鉴于静稳天气下湖流响应饱和、流速增长有限，建议在秋季等非防洪关键期和弱风季节适时开展“引江济巢”补水调度，通过增加入湖流量增强形成压强梯度力引导水体交换路径。通过水动力综合调控措施，将风流耦合强度、局地滞留风险作为调度决策的重要约束，有助于实现提升全湖水交换能力与防范污染物局地富集的双重目标。

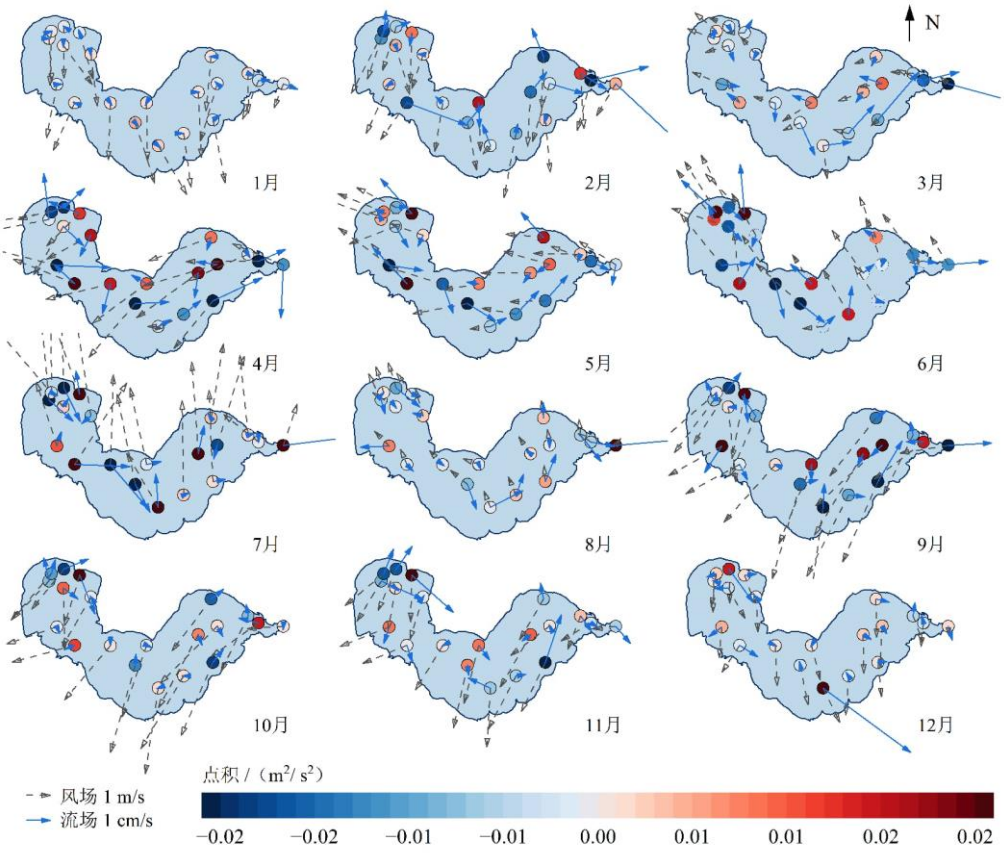

图 10　巢湖风场、流场矢量耦合关系时空分布

Fig.10 Spatiotemporal Distribution of Vector Coupling Relationship Between Wind Field and Flow Field in Lake Chaohu

4 结论

本研究基于巢湖 2024 年 20 个自动监测站的高频风场与流场数据，系统分析了巢湖流场的时空演变特征及其对风场变化的响应机制，主要结论如下：

1）2024 年巢湖湖区风场具有显著季节转换特征，并主导流场年内动力变化过程。春季主导风向为东风，夏季转为东南风和南风，秋冬季则以东北风和北风占优。全湖矢量平均风速约 1.0 m/s，绝对平均风速约 3.4 m/s。在此季风背景下，巢湖流场整体呈“西入东出”的弱流输运格局，全湖矢量平均流速仅 0.35 cm/s，绝对平均流速为 5.18 cm/s，各站点年均流速介于 3.75~9.87 cm/s 之间。高流速区主要集中于南淝河、新河及兆河等入湖河口与东部出湖口，而西北部湖湾、湖心及部分近岸区长期维持低流速状态。垂向观测进一步表明，巢湖流动以水平输运为主，垂向流速仅为 m m/s 量级，垂向交换能力有限。

2）巢湖流场在季节、月及日尺度上均表现出显著的时空异质性和高频波动特征。春夏季全湖平均流速分别为 0.92 cm/s 和 0.89 cm/s，明显高于秋冬季的 0.53 cm/s。“引江济巢”调水期间，兆河入湖区日均

流速稳定维持在9.69~14.82 cm/s。8个国控站点绝对平均流速为1.54 cm/s，平均流速变异系数高达94.06%，流向标准差为93.4°~144.5°，流向离散系数达到73.5%~95.8%，平均合成流速比仅0.28，表明巢湖流场整体呈现“低流速、高波动、强离散”的典型浅水湖泊动力特征。

3）风场是驱动巢湖流场变化的重要外源动力，但其作用强度受径流过程、湖盆地形及岸线边界条件共同调制，表现出显著空间差异。20个监测站点风速与流速总体呈显著正相关（P<0.01），其中南淝河入湖区相关性最高（r=0.377）。风速-流速散点分布呈明显“扇形扩散”特征，反映出风生流响应具有非线性增强与动力饱和特征。本质上，巢湖流场演化是风应力输入、底床摩擦耗散、径流惯性输运及湖盆边界约束共同作用的结果，其中湖心区更易形成稳定风生输运，河口及复杂岸线区域则易产生局地环流、剪切流与回流结构。

研究结果表明，在巢湖水环境治理与生态调度过程中，应充分考虑风流耦合及局地弱流滞留效应，以提升湖区水体交换与污染物扩散能力。

致谢：感谢本研究团队王岩、崔健、管玉莹等在巢湖野外监测过程中给予的帮助。

5 参考文献

[1] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]

[2] Qin BQ, Hu WP, Chen WM *et al*. Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang Bay, northern Taihu Lake, China. *J Lake Sci*, 2000, **12**(4): 327-334, 385. DOI:10.18307/2000.0406. [秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 327-334, 385.]

[3] Qin BQ, Fan CX. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China Environmental Science*, 2002, **22**(2): 150-153. [秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨.中国环境科学, 2002, **22**(2): 150-153.]

[4] Zhu GW, Qin BQ, Zhang L *et al*. Wave effects on nutrient release of sediments from Lake Taihu by flume experiments. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 61-68. [朱广伟, 秦伯强, 张路等. 太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验.湖泊科学, 2005, **17**(1): 61-68.]

[5] Sun XJ, Qin BQ, Zhu GW *et al*. Release of colloidal N and P from sediment of lake caused by continuing hydrodynamic disturbance. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1223-1229. DOI: 10.13227/j.hjkx.2007.06.010. [孙小静, 秦伯强, 朱广伟等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放. 环境科学, 2007, **28**(6): 1223-1229.]

[6] Zhang YM, Zhang YC, Zhang LJ *et al*. The influence of lake hydrodynamics on blue algal growth. *China Environmental Science*, 2007, **27**(5): 707-711. [张毅敏, 张永春, 张龙江等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响.中国环境科学, 2007, **27**(5): 707-711.]

[7] Liu XH, Feng LQ, Zhang YL *et al*. Effects of hydrodynamic process on bio-optical properties in algal-dominated lake region of shallow lake. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 412-420. DOI: 10.13227/j.hjkx.2012.02.002. [刘笑菡, 冯龙庆, 张运林等. 浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响. 环境科学, 2012, **33**(2): 412-420.]

[8] Qi L, Yang Y, Wang Y *et al*. Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2012, **40**(4): 438-445. [齐亮, 杨宇, 王悦等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征.河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(4): 438-445.]

[9] Qiu JJ, Yuan SY, Tang HW *et al*. Hydrodynamic responses of fish community dynamics in large-scale morphologically complex river systems. *Water Resources Research*, 2025, **61**(7): e2025WR040690. DOI: 10.1029/2025WR040690.

[10] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q *et al*. Two-dimensional numerical simulation of hydrodynamic and pollutant transport for Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 893-902. [赖锡军, 姜加虎, 黄群等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟.湖泊科学, 2011, **23**(6): 893-902.]

[11] Zhang FB, Hu WP, Qin BQ. Numerical analysis on influence of topography on wind-driven current in lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(12): 34-38, 45. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2004.12.006 . [张发兵, 胡维平, 秦伯强. 湖底地形对风生流场影响的数值研究. 水利学报, 2004, **35**(12): 34-38, 45.]

[12] Zhou QC, Chen H, Cheng BH *et al*. A study of the effect of lake shape on hydrodynamics and eutrophication. *Sustainability*, 2025, **17**(4): 1720-1720. DOI: 10.3390/su17041720.

[13] 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.]

[14] Zhao W, Mao HY, Sun LF *et al*. Effect of rainfall and water level rise and fall on stability of core wall embankment. *Water*, 2024, **16**(23): 3340-3340. DOI: 10.3390/w16233340.

[15] Wu TF, Zhu GW, Qin BQ *et al*. Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 409-415. DOI: 10.18307/2012.0312. [吴挺峰,朱广伟,秦伯强等.前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响.湖泊科学,2012,**24**(3):409-415.]

[16] Jalil A, Li YP, Zhang K *et al*. Wind-induced hydrodynamic changes impact on sediment resuspension for large, shallow Lake Taihu, China. *International Journal of Sediment Research*, 2019, **34**(3): 205-215. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2018.11.003.

[17] Jiang JH, Huang Q. A 2-dimension numerical simulation of inflow/outflow in Hongze lake. *J Lake Sci*, 1997, **9**(1): 9-14. [姜加虎, 黄群. 洪泽湖吞吐流二维数值模拟. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 9-14.]

[18] Han HJ, Hu WP, Jin YQ. Numerical experiments on the influences of inlet and outlet flow on lake current. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007, **29**(S1): 37-46. [韩红娟, 胡维平, 晋义泉. 吞吐流量对湖泊流场结构影响的数值试验. 海洋湖沼通报, 2007, **29**(S1): 37-46.]

[19] Jiang HZ, Cui L, Shi F *et al*. Study on influences of wind field, topography and inflow/outflow on flow in lake Tai. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(6): 165-171. [姜恒志, 崔雷, 石峰等. 风场、地形和吞吐流对太湖流场影响的研究.水力发电学报, 2013, **32**(6): 165-171.]

[20] Liu BJ, Xia J, Zhu FL *et al*. Response of hydrodynamics and water-quality conditions to climate change in a shallow lake. *Water Resources Management*, 2021, **35**(14): 4961-4976. DOI: 10.1007/s11269-021-02982-5.

[21] Xu S, Zhai L, Zou B *et al*. Multiscale analysis of water area, level and flow and their relationships for a large lake connected to rivers: A case study of Dongting Lake, China. *Water*, 2024, **16**(9): 19. DOI: 10.3390/w16091198.

[22] Liu HF, Zhu ZX, Liu JL *et al*. Numerical analysis of the impact factors on the flow fields in a large shallow lake. *Water*, 2019, **11**(1): 155. DOI: 10.3390/w11010155.

[23] Hu WP, Pu PM, Qin BQ. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake, China(II): The typical wind-driven current and its divergence. *J Lake Scis*, 1998, **10**(4): 26-34. DOI:10.18307/1998.0404. [胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究——2.典型风场风生流的数值计算. 湖泊科学, 1998, **10**(4): 26-34.]

[24] 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.

[25] Cheng HM, Yang FK, Zhang J *et al*. Research progress on river and lake water quality assessment based on machine learning. *Environmental Science*, 2025, **46**(6): 3349-3360. DOI: 10.13227/j.hjkx.202406089. [程浩淼, 杨富康, 张健等. 基于机器学习的河湖水质评估的研究进展. 环境科学, 2025, **46**(6): 3349-3360.]

[26] Peng ZL, Hu YM, Liu G *et al*. Calibration and quantifying uncertainty of daily water quality forecasts for large lakes with a Bayesian joint probability modelling approach. *Water Research*, 2020, **185**: 116162. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116162.

[27] Zhang Q, Liu YB, Yao J *et al*. Lake hydrology in China: Advances and prospects. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1360-1379. DOI: 10.18307/2020.0511. [张奇, 刘元波, 姚静等. 我国湖泊水文学研究进展与展望. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1360-1379.]

[28] Bennington V, McKinley GA, Kimura N *et al*. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 2010, **115**(C12): 2010JC006261. DOI: 10.1029/2010JC006261.

[29] Rao YR, Milne JE, Marvin CH. Hydrodynamics and water quality in western Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, **38**: 91-98. DOI: 10.1016/j.jglr.2012.04.001.

[30] Bai XZ, Wang J, Schwab DJ *et al*. Modeling 1993–2008 climatology of seasonal general circulation and thermal structure in the Great Lakes using FVCOM. *Ocean Modelling*, 2013, **65**: 40-63. DOI: 10.1016/j.ocemod.2013.02.003.

[31] Beletsky D, Schwab D, McCormick M. Modeling the 1998–2003 summer circulation and thermal structure in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 2006, **111**(C10): 2005JC003222. DOI: 10.1029/2005jc003222.

[32] Beletsky D, Hawley N, Rao YR. Modeling summer circulation and thermal structure of Lake Erie. *Journal of Geophysical Research*: *Oceans*, 2013, **118**(11): 6238-6252. DOI: 10.1002/2013JC008854.

[33] Maceina MJ, Soballe DM. Wind-related limnological variation in lake okeechobee, *Florida*. *Lake and Reservoir Management*, 1990, **6**(1): 93-100. DOI: 10.1080/07438149009354699.

[34] Zhang C, Chen LW. A review of wind-driven hydrodynamics in large shallow lakes: Importance, process-based modeling and perspectives. *Cambridge Prisms*: *Water*, 2023, **1**: e16. DOI: 10.1017/wat.2023.14.

[35] Likhoshway YV, Kuzmina AY, Potyemkina TG *et al*. The distribution of diatoms near a thermal bar in lake baikal. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, **22**(1): 5-14. DOI: 10.1016/S0380-1330(96)70929-2.

[36] Hu WP, Qin BQ, Pu PM. Three-dimensional numerical experiments on hydrodynamics in Taihu Lake-3. Influence of the reclaimation in Mashan district on wind-driven current. *J Lake Sci*, 2000, **12**(4): 335-342. DOI: 10.18307/2000.0407. [胡维平, 秦伯强, 濮培民. 太湖水动力学三维数值试验研究——3.马山围垦对太湖风生流的影响.湖泊科学, 2000, **12**(4): 335-342.]

[37] Xue ZP, Zhu W, Cheng L *et al*. Wind-driven hydrodynamic characteristics of Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, **31**(17): 26123-26140. DOI: 10.1007/s11356-024-32930-w.

[38] Yu ML, Hong GX, Zhu GW *et al*. Wind field influences on the spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3519-3529. DOI: 10.13227/j.hjkx.201901184. [余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响. 环境科学, 2019, **40**(8): 3519-3529.]

[39] 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.

[40] Lai GY, Wang P, Huang XL *et al*. A simulation research of impacts of the Lake Poyang hydraulic project on hydrology and hydrodynamics. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 128-140. DOI:10.18307/2015.0116. [赖格英, 王鹏, 黄小兰等. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水动力影响的模拟.湖泊科学, 2015, **27**(1): 128-140.]

[41] 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.]

[42] Zhang YH, Hu WP. Wind wave characteristics of Lake Chaohu under the influence of typhoon. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 236-245. DOI: 10.18307/2020.0122. [张怡辉, 胡维平. 台风影响下巢湖风浪特征研究. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 236-245.]

[43] Peng ZL, Zhang YH, Zhu JG *et al*. Large lake sluice operations during an extreme rainfall season greatly affect circulation and water quality dynamics of a shallow eutrophic lake. *Science of the Total Environment*, 2021, **781**: 146756. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146756.

[44] Gong R, He Y, Xu LG *et al*. The application progress of environmental fluid dynamics code (EFDC) in lake and reservoir environment. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016, **38**(6): 12-19. [龚然, 何跃, 徐力刚等. EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)模型在湖库水环境模拟中的应用进展. 海洋湖沼通报, 2016, **38**(6): 12-19.]

[45] Pareta K, Pareta U. A review of cloudbursts events in the Himalaya region, and 2D hydrodynamic simulation using MIKE models. *Natural Hazards*, 2025, **121**(8): 9161-9193. DOI: 10.1007/s11069-025-07173-8.

[46] Lesser GR, Roelvink JA, van Kester JATM *et al*. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 2004, **51**(8/9): 883-915. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014.

[47] Pyo J, Park LJ, Pachepsky Y *et al*. Using convolutional neural network for predicting cyanobacteria concentrations in river water. *Water Research*, 2020, **186**: 116349. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116349.

[48] Peng ZL, Hu WP, Liu G *et al*. Development and evaluation of a real-time forecasting framework for daily water quality forecasts for Lake Chaohu to Lead time of six days. *Science of the Total Environment*, 2019, **687**: 218-231. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.067.

[49] Peng ZL, Hu WP, Liu G *et al*. Estimating daily inflows of large lakes using a water-balance-based runoff coefficient scaling approach. *Hydrological Processes*, 2019, **33**(19): 2535-2550. DOI: 10.1002/hyp.13486.

[50] 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.

[51] Liu Y, Zhang JS, Wang H *et al*. Water quality change and influencing factors in Chaohu Lake during the 13th Five-Year Plan period. *Environmental Monitoring in China*, 2025, **41**(3): 70-82. [刘阳, 张劲松, 王欢等. “十三五”期间巢湖水质变化及影响因素. 中国环境监测, 2025, **41**(3): 70-82.]

[52] Peng ZL, Hu WP. A modelling approach for dynamic water quality target setting on multiple time-scales for subzones of Lake Taihu based on ecosystem improvement. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 988-997. DOI: 10.18307/2019.0417. [彭兆亮, 胡维平. 基于水生态改善的太湖分区分时动态水质目标制定方法. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 988-997.]

[53] Yin CQ, Wang TJ, Shi CE *et al*. Analysis on wind characteristics at typical sites over Chaohu Lake basin. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, **35**(2): 249-256. [殷长秦, 王体健, 石春娥等. 巢湖流域典型站点的风场特征分析. 大气科学学报, 2012, **35**(2): 249-256.]

[54] Peng ZL, Chen CR, Wan J *et al*. Water particle tracking in inflow water for Hongze lake and lake Chaohu based on Lagrangian method. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, **51**(6): 1275-1287. [彭兆亮, 陈昌仁, 万骏等. 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.海洋与湖沼, 2020, **51**(6): 1275-1287.]

[55] 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*, 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.]

[56] Yi YJ, Wei Z, Guo YM *et al*. Simulations of influence of different water transfer methods on water quality in Chaohu Lake. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, **43**(9): 1-12. DOI: 10.11660/slfdxb.20240901. [易雨君, 魏震, 郭玉明等. 不同调水方式对巢湖水质影响模拟. 水力发电学报, 2024, **43**(9): 1-12.]

[57] Peng ZL, Wang QJ, Bennett JC *et al*. Seasonal precipitation forecasts over China using monthly large-scale oceanic-atmospheric indices. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 792-802. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.012.

[58] Howell ET, Chomicki KM, Kaltenecker G. Tributary discharge, lake circulation and lake biology as drivers of water quality in the Canadian Nearshore of Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, **38**: 47-61. DOI: 10.1016/j.jglr.2012.03.008.

[59] Jiang JH, Huang Q. Numerical simulation of wind-driven current in Hongze lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1996, **18**(3): 7-12. [姜加虎, 黄群. 洪泽湖风生流数值模拟. 海洋湖沼通报, 1996, **18**(3): 7-12.]

[60] Zhang YH, Hu YM, Peng ZL *et al*. Fast-changing wind waves and their environmental effects in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 985-993. DOI: 10.18307/2022.0322. [张怡辉, 胡月敏, 彭兆亮等. 巢湖快速变化风浪场及其环境效应. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 985-993.]

[61] Lövstedt CB, Bengtsson L. Density-driven current between reed belts and open water in a shallow lake. *Water Resources Research*, 2008, **44**(10): 2008WR006949. DOI: 10.1029/2008WR006949.

[62] Schlosser TL, Lucas AJ, Jones NL *et al*. Local winds and encroaching currents drive summertime subsurface blooms over a narrow shelf. *Limnology and Oceanography*, 2022, **67**(4): 888-902. DOI: 10.1002/lno.12043.

[63] Chen YY, Liu QQ. Numerical study of hydrodynamic process in Chaohu Lake. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2015, **27**(5): 720-729. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60534-0.

[64] Zhang YH, Hu WP, Peng ZL. The characteristics of wind waves in Lake Chaohu in 2018. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 1177-1188. DOI: 10.18307/2020.0424. [张怡辉, 胡维平, 彭兆亮. 2018 年巢湖风浪特征分析. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1177-1188.]

[65] Ding WH, Wu TF, Qin BQ *et al*. Features and impacts of currents and waves on sediment resuspension in a large shallow lake in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(36): 36341-36354. DOI: 10.1007/s11356-018-3471-3.

[66] Wei Q, Xue LQ, Liao SM *et al*. Analysis of driving forces on ecohydrological regime and environmental flow changes in Hongze Lake, China. *Ecological Informatics*, 2024, **79**: 102423. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102423.