# 定常风场和吞吐流对乌梁素海流场的影响*

王志超[1] 施青松[1] 李 兴[2] 李卫平[1①] 杨文焕[1] 于玲红[1]

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院 包头 014010; 2. 内蒙古师范大学内蒙古节水农业工程研究中心 呼和浩特 010020)

摘要 风场和吞吐流是浅水湖泊运动的主要驱动力, 影响着湖区污染物的迁移转化。基于二维非结构网格, 构建了乌梁素海水动力模型。通过对比定常风作用下湖流的方向、环流的分布及形式与无风条件下的区别, 模拟不同算例吞吐流作用下湖区流速及环流结构的差异, 探究了定常风和吞吐流对乌梁素海流场的影响。结果表明: 乌梁素海在无风条件下出现大面积的滞流区; 风场会增加湖流的流速, 影响区域主要在西大滩区、东大滩区及湖区南部明水区, 产生明显环流, 风场是乌梁素海主要的驱动力; SSW 与 ENE 向风场作用下, 典型区域产生的环流位置、形态结构相近, 方向相反; 吞吐流量的增加会增大湖区整体流速, 对湖区流场形态、结构影响较小; 定常风条件下, 吞吐流量的增加(一定范围)会导致环流强度减弱。研究结果为乌梁素海营养盐、污染物质输移规律研究奠定基础。

关键词 乌梁素海; 定常风; 吞吐流; 水动力模拟

中图分类号 X143 doi: 10.11693/hyhz20201000279

水动力过程对湖泊中物质与能量的迁移转化起到决定性作用, 是湖泊中污染物、泥沙等输移的重要基础; 湖泊水动力特性主要与湖泊本身轮廓特征、吞吐流、风驱动力等物理参数有关(李一平等, 2012, 2014; Yao *et al*, 2019; Chen *et al*, 2020)。对于大型浅水湖泊而言, 风和吞吐流为其主要的驱动力, 风场会改变湖水的运动轨迹, 决定着湖泊的环流形态、结构及湖流流速的大小, 影响物质在水体中的迁移与扩散, 进而对湖泊水环境产生影响(姚静等, 2016; Liu *et al*, 2019)。吞吐流也是湖水运动的主要驱动力之一, 它通过水体交换, 进而对湖泊营养盐扩散与迁移、泥沙冲淤及湖水污染物浓度场的变化产生影响(Gao *et al*, 2015; 赵正文, 2018)。

在大型浅水湖泊水动力研究过程中, 对于湖泊的实时监测不易实现, 故数值模拟是研究湖泊水动力的重要手段之一。已有研究对湖泊水动力的数值模拟开展得比较深入: 如针对太原市迎泽湖的富营养化问题, 武春芳等(2014)通过调整补水方式、补水频率、湖泊柔性结构三方面, 提出改变水动力条件的方案并进行数值模拟, 结果表明: 通过加大湖泊的水力循环能力、改善入湖口水质的控制方案可以有效改善水质; 鄱阳湖存在倒灌现象, 唐昌新等(2015)借助 EFDC 的染色剂模块及水龄模块模拟了鄱阳湖的全年水动力变化过程, 长江倒灌的条件是临界来流大于实际总来流, 2008 年鄱阳湖的倒灌入流扩散面积占全湖总面积的 0.97%, 6.6%, 3.5%, 12.6%, 鄱阳湖水龄可由长江的顶托作用时间加倒灌水体泻出时间估算; 北方湖泊冬季出现结冰现象, 陈友媛等(2012)针对这一现象在东昌湖水动力模型中引入了冰盖因素, 分析六种风应力拖拽系数对水动力的影响, 讨论了冰盖面积对水动力的影响, 发现覆盖冰盖的水域, 风应力对水动力作用会被减弱甚至抵消。但上述研究通常将风场、吞吐流等物理参数作为次要影响因素, 对于风场、吞吐流与大型浅水湖泊流场的响应关系鲜有研究。

乌梁素海是我国典型的大型浅水湖泊, 其南北

* 国家重点研发计划项目, 2019YFC0409204 号; 内蒙古自治区科技计划项目, 2020GG0208 号; 内蒙古自治区自然科学基金项目, 2019BS05004 号, 2020MS02017 号, 2020LH02008 号。王志超, 硕士生导师, E-mail: wzc5658@126.com

① 通信作者: 李卫平, 硕士生导师, 教授, E-mail: sjlwp@163.com

收稿日期: 2020-10-12, 收修改稿日期: 2021-01-22

长 35—40 km, 东西宽 5—10 km。湖区面积多年维持在 293 km², 库容在 2.5 亿—3 亿 $m^3$ 之间。湖区总体水深浅, 平均水深在 0.8—1.5 m 之间, 最大水深只有 3 m 左右。湖底高程变化不明显, 南北方向呈现北高南低的趋势, 淤泥层厚, 深水区多为主航道(李兴, 2009; 田伟东等, 2016)。乌梁素海地处西风地带, 风期较长, 风速较大, 年平均风速在 2.5—3.4 m/s 之间, 年最大风速 18—40 m/s。同时乌梁素海也是河套灌区重要的组成部分, 是确保黄河内蒙古段枯水期不断流的重要调蓄补给库, 承接河套灌区百分之九十以上的农田灌溉排水、生活污水、工业废水, 具有改善水质, 减少污染物质对黄河水质直接影响的作用(赵锁志, 2013)。但由于水体流速缓慢、换水周期长、自净能力差, 导致乌梁素海水环境受到了一定的影响(田伟东, 2016)。想要研究乌梁素海的水环境问题, 需要找到根本原因及关键影响因素。水动力特征与规律的研究对改善乌梁素海水环境问题具有重要意义, 精准地模拟和评估风场及吞吐流在湖区的影响形式, 对于湖泊水动力的研究尤为关键, 因此进一步开展乌梁素海水动力的模拟具有宝贵的实际应用价值和科学价值。本文基于二维水动力模型, 设置定常风场和不同算例的吞吐流量, 模拟不同情况下的乌梁素海流场形态, 分析风场及吞吐流对乌梁素海的主要影响区域、影响量级及流态响应机制, 为研究乌梁素海污染物的迁移转化等研究提供理论支撑。

## 1　研究方法及方案设计

### 1.1　模型控制方程

水动力模型遵循 Navier-Stokes 方程、Boussinesq 假设和流体的静定假设。基本方程式如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}=hS, \tag{1}$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y}=f\,\bar{v}h-gh\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x}+$$
$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_0}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_0}-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{xy}\right)+hu_sS \tag{2}$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x}=-f\,\bar{u}h-gh\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y}+$$
$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_0}-\frac{\tau_{by}}{\rho_0}-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xy}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{yy}\right)+hv_sS \tag{3}$$

式中: $t$ 为时间, 单位为 d; $x$, $y$ 为笛卡尔坐标系下坐标, 单位为 m; $\eta$ 为表面水位, 单位为 m; $d$ 为静水水深; $h$ 为总水深, $h=\eta+d$, 单位为 m; $f$ 是科氏力系数, $f=2\Omega\sin\Phi$, $\Omega$ 为地球自转角度速率, $\Phi$ 为当地维度, 单位为 1/s; g 为重力加速度, 单位为 $m/s^2$; $\rho_0$ 为(淡)水的参考密度, 单位为 g/ml; $\rho$ 为水的密度, 单位为 g/mL; $\tau_{sx}$, $\tau_{sy}$, $\tau_{bx}$, $\tau_{by}$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向的表面风应力和底部切应力, 单位为 N; $S$ 为源项, 单位为 $kg/(m^3\cdot s)$; $v_s$、$u_s$ 为源项水流流速, 单位为 m/s; $\bar{u}$, $\bar{v}$ 为流速在水深上的平均值, 单位为 m/s; $T_{xx}$, $T_{xy}$, $T_{yy}$ 为侧向应力, 单位为 N; $p_a$ 为当地大气压强, 单位为 Pa; $s_{xx}$, $s_{xy}$, $s_{yx}$, $s_{yy}$ 为辐射张量, 单位为 Pa。

### 1.2　水动力模型建立

乌梁素海水动力模型的构建首先需要制作网格文件, 插入湖底地形高程, 然后将网格文件导入水动力模块, 同时输入边界条件、初始条件、相关参数等, 最后通过水动力模块输出结果得到模拟数据(如水位、水深、流速等)。数据的收集整理、模型的构建均由作者完成。

**1.2.1**　计算区域和网格划分　　乌梁素海主要补给源为总排干渠、八排干渠、九排干渠、十排干渠, 其中总排干渠约占总补给量的 88%, 湖水由乌毛计退水口排出。进出口位置、湖底高程如图 1 所示。乌梁素海平均水深 0.8—1.5 m, 相较于平面尺度很小, 故

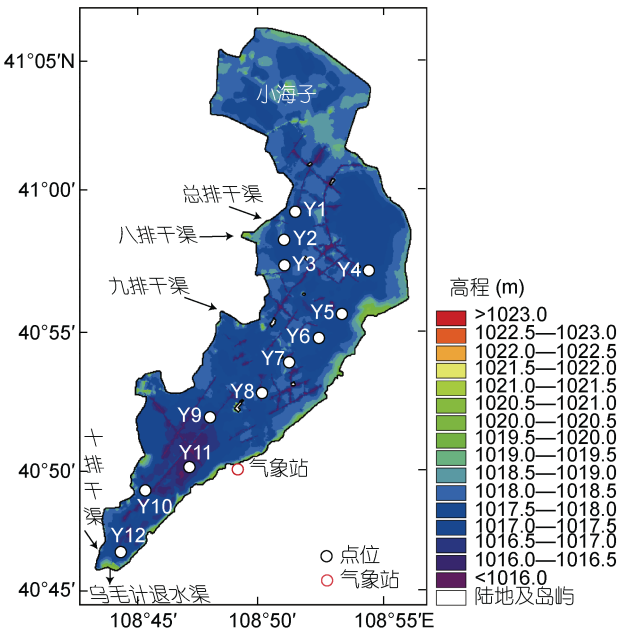



图 1　乌梁素海湖底高程及监测点位分布

Fig.1　Bottom elevation and monitoring point distribution of *Wuliangsu* Lake

假设水体垂向掺混均匀, 选用垂向均匀的平面二维不可压缩模型。乌梁素海每年 11 月初至翌年 3 月末为冰封期, 由于冰盖作用, 风场对流场影响无需考虑, 故本模型的模拟时间为 2018 年 4 月 1 日—11 月 1 日, 时间步长为 3600 s。针对乌梁素海湖岸沿线蜿蜒曲折的特点, 选择三角形非结构网格, 三角网格划分区域更加细致稳定, 能够更好地拟合地形和湖岸边界。模型共布置网格单元 12005 个, 节点数为 6643 个, 网格尺寸最小为 150 m, 最大为 280 m, 平均尺寸为 240 m。生成网格后, 将乌梁素海湖底的坐标及高程值制作成 *X*, *Y*, *Z* 格式的文件(*X* 为横坐标, *Y* 为纵坐标, *Z* 为高程值), 输入到模拟软件中, 生成水下地形图。

**1.2.2** 定解条件 本次模拟的乌梁素海水动力模型上游入湖源汇项包括总排干渠、八排干渠、九排干渠、十排干渠, 下游出湖源汇项为乌梁素海乌毛计退水渠, 各源汇项流量数据分别为各排干渠及乌毛计退水渠 2018 年 4 月至 10 月逐日流量数据。根据《乌梁素海综合治理规划》, 到 2020 年, 乌梁素海水位控制在 1018.8—1019.2 m, 故模型运行的初始水位取 1019.2 m(水位值和湖底地形高程值都基于海平面)。乌梁素海位于干旱半干旱地区, 太阳辐射强、蒸发量大、降雨量小、干湿期差异大, 精准的蒸发量和降雨量数据使模型更加稳定, 降雨量和蒸发量数据采用气象站 2018 年 4 月至 10 月每 15 min 一次的监测数据。风场数据来源与时间区间同上。

**1.2.3** 参数设置 本模型主要率定的参数为糙率系数, 糙率系数是水力学计算的关键参数, 与水深、床面形态、植被条件等因素有关(吴乔枫等, 2018)。以芦苇为主的多种挺水植物大量生长的区域面积和湖泊明水面积相间分布是乌梁素海主要特征之一, 水面有一半被芦苇覆盖, 所以糙率系数并不是单一的数值。本模拟将遥感影像图在 Arcgis 中划分为不同的区域类型, 勾勒出湖区现状的各种区域的轮廓图, 对芦苇区、明水区、水道等分别定义, 设置不同的糙率系数(赵振兴, 2013)。相对于比插值法, 这种方法更加准确地定义了湖区不同区域的糙率系数, 更适用于乌梁素海的水文特征, 使模型更加精确。糙率系数值如表 1 所示。

**表 1** 不同地形糙率系数及曼宁系数

Tab.1 Roughness and Manning coefficient of different terrain

| 地形类别 | 曼宁系数($\sqrt[3]{m}$/s) | 糙率系数 |
|---|---|---|
| 芦苇区 | 4.17 | 0.24 |
| 明水区 | 28.57 | 0.035 |
| 水道 | 40 | 0.025 |

**1.2.4** 模型的验证 由于缺乏乌梁素海湖区实测数据, 故采取人工监测的手段。在湖区设置了 12 个监测点位(Y1—Y12), 监测频率为每月 3 次, 监测内容为湖区 12 个点位的水深, 水深值采用 SR-100 型湖泊水深测深仪测量, 点位分布如图 1 所示。为了减小湖泊水深值测定的结果因环境、仪器操作原因产生的误差, 每个点位测量 3 次, 取平均值作为该点的实测水深值。本研究采用 2018 年 4—10 月湖内 12 个样点的实测数据和模型运行结果数据进行对比验证, 结果表明: 各点位水深相对误差均在±3%之内, 确定性系数和纳什效率系数也均达到 0.96 以上。依据点位区域分布特点选取 4 个代表性点位, 分别为西大滩区 Y2、东大滩区 Y4、芦苇区 Y7、南部明水区 Y11, 制作水深验证图(图 2)。

### 1.3 风场分析及模拟方案

风场数据采用位于坝头村的乌梁素海湖泊湿地观测研究站实测的 2015—2018 年逐日每 15 min 一次的风速、风向资料。乌梁素海湖区面积较大, 湖区不同位置风场存在差异, 但由于缺少多个监测站的实测风场资料, 故本研究假定全湖风场在空间分布上一致。本文主要研究乌梁素海盛行风场对湖泊的水动力场影响, 故对于收集到的风场资料进行统计, 得到出现频率较高的风向并同时计算出其对应的平均风速, 模拟该风向、风速对湖泊水动力场的影响方式和差异。通过监测站数据风玫瑰图(图 3)可知, 乌梁素海 4—10 月以 SSW 向风场为主, ENE 向风场次之, SSW 向风场平均风速为 2.46 m/s, ENE 向风场平均风速为 2.56 m/s, 故分别模拟 2018 年 4 月 1 日—11 月 1 日期间无风、SSW 向定常风、ENE 向定常风 3 种情况下的水动力变化过程, 2 种风向平均风速均取 2.5 m/s。风场是影响湖泊水动力的主要因素, 湖泊水动力影响湖泊污染物的迁移、水质的分布等。设置定常风场主要针对真实风场中出现的频率较高的、作用时间较长的风场, 模拟得到乌梁素海湖区大部分时间流场的形态进行研究, 分析水动力对乌梁素海水质分布的影响, 为乌梁素海的水质研究提供一定的理论支撑。

### 1.4 水情分析及算例设计

根据 2018 年 4—10 月各排干渠数据(图 4)得到此期间进出口最大吞吐流量和最小吞吐流量。由于九、十排干渠吞吐流对湖区南部区域影响较小, 故主要研究吞吐流对总排干渠和八排干渠口附近区域的影响。为了对比不同吞吐流量作用下乌梁素海的水流

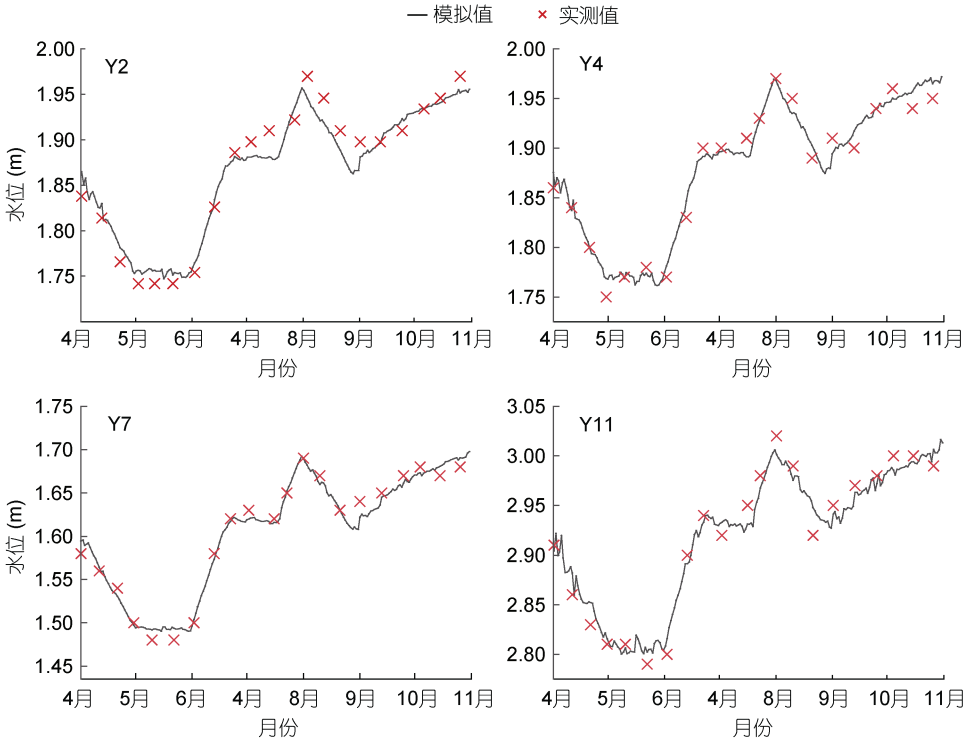



图 2　2018 年 4—10 月水深验证图

Fig.2　Verification for the water depth from April to October, 2018

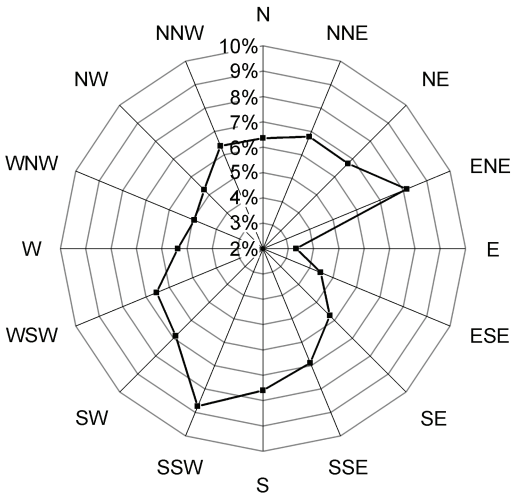



图 3　2015—2018 年风玫瑰图

Fig. 3　Rose map of wind from 2015 to 2018

注: N: 北风; E: 东风; W: 西风; S: 南风

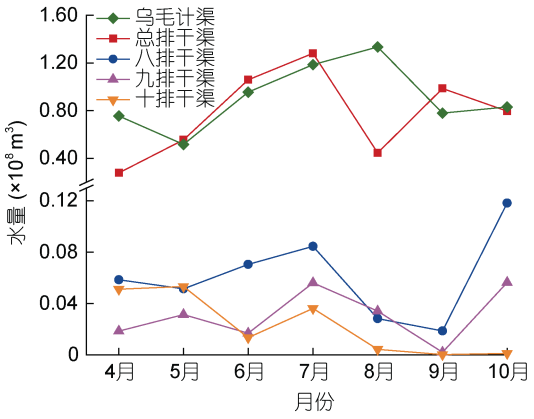



图 4　2018 年乌梁素海进出口水量

Fig.4　Import and export water volume of *Wuliangsu* Lake in 2018

特征，研究吞吐流与风场 2 种驱动力的作用关系，设计了以下 4 种算例进行模拟，具体算例如下:

算例 1: 总排干渠入湖流量为 47.81 $m^3/s$、八排干渠入湖流量为 4.4 $m^3/s$，乌毛计退水渠出湖流量为 49.82 $m^3/s$，无风;

算例 2: 总排干渠入湖流量为 16.6 $m^3/s$、八排干渠入湖流量为 0.7 $m^3/s$，乌毛计退水渠出湖流量为 19.31 $m^3/s$，无风;

算例 3: 总排干渠入湖流量为 16.6 $m^3/s$、八排干渠入湖流量为 0.7 $m^3/s$，乌毛计退水渠出湖流量为 19.31 $m^3/s$，2.5 m/s 的 SSW 向定常风场;

算例 4: 总排干渠入湖流量为 47.81 $m^3/s$、八排干渠入湖流量为 4.4 $m^3/s$，乌毛计退水渠出湖流量为 49.82 $m^3/s$，2.5 m/s 的 SSW 向定常风场。

## 2 结果与分析

### 2.1 风场对湖区流速的影响

为了分析风场对乌梁素海流速的影响，将有风作用下的湖泊流场与无风条件的流速分布进行比较。在无风状态下，湖区流速分布不均匀，西大滩区流速较大，而南部湖区及北部小海子人工湿地水流几乎静止，造成这种现象的主要原因是：乌梁素海湖底地形整体地势较为平坦(北高南低)，没有大的湖底地形高程差，不会因为高程差产生较大的流速；总排干渠、八排干渠位于湖区的西部，排干渠的水流进入湖体，水量越大，流速越大；湖泊中部是芦苇茂盛地区，芦苇面积占 25%以上，水流经过芦苇区，流速衰减，随水流方向到达南部时，流速衰减殆尽。北部小海子同样是芦苇茂密区，并且北部地势略高于南部，流速衰减更加明显。由此可以看出，单一的吞吐流无法满足乌梁素海湖区良好的水动力条件，风驱动力是乌梁素海流场的关键驱动力，风场作用下，大部分湖区流速增加，湖区明水面出现多处环流，芦苇区的流速受风场影响较小。

### 2.2 定常风对湖区流场的影响

乌梁素海芦苇区面积较大，湖泊被芦苇区分成了几处明水区域。明水面由于没有芦苇遮挡，出现了受风场影响明显的环流区域。鉴于风场对湖区不同空间的影响形式和效果存在差异，划分出湖区风生流较为明显的 3 处区域进行研究对比。图 5 中 A 区域为西大滩区, B 区域为东大滩区, C 区域为南部湖区。定常风场作用下，流场于 2018 年 4 月 1 日 6:00 便趋于稳定状态，流场形态基本不发生变化。八月相较于其他月份为丰水月，模型中环流形态效果呈现更加明显，故选择 2018 年 8 月 1 日 10:00 的瞬时流场作为典型流场进行分析。

A 区域(图 6)位于湖区西部，来自总排干渠、八排干渠的水流汇入该区域，在无风条件下，该区域流速受排干渠吞吐流影响相对较大，水由排干渠口进入该区域导致进口附近流速较大，流速随着水流方向递减。在 SSW 风向作用下，总排干渠进水口浅水区流向东南方向的水流受到影响，改变了原本的流向，向东北方向偏移，与该区域远离排干渠口的中心区域向西南方向的补偿流形成小尺度顺时针环流，环流中心流速近乎为 0 m/s。A 区域东南方向靠近芦苇带的浅水区的水流也受到影响，流向与风向一致，流速较大，超过 0.01 m/s，与中部区域的补偿流及排干渠口附近的水流同时作用形成不规则的“几”字型。在 ENE 向风场下，入湖口附近的浅水区水流仍然受到风场的影响，整体流向东南方向。东南部靠近芦苇带的浅水区域水流流向西南方向，拉动中部形成补偿流，区域整体水流呈“S”型，区域北部伴有小尺度逆时针环流。2 种风向在 A 区域产生的环流形态呈中心对称。

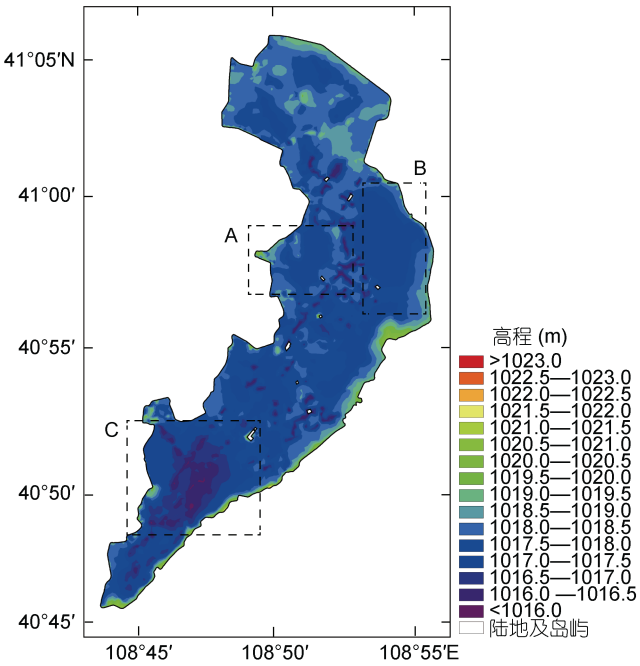



图 5 典型环流区域(A、B、C)划分

Fig.5 Regional division of typical circulation (A、B、C)

水流从 A 区域流向 B 区域(图 7)主要通过连接 2 个区域的航道实现，航道内部流速相较于芦苇区较大，在无风条件下，由于芦苇的阻挡，到达 B 区域后流速逐渐衰减，水流到达 B 区域时东部时，流速衰减为 0 m/s，出现大面积滞流区。在 SSW 向风场作用下，B 区域东南方向浅水区域受到风向的影响，沿着 B 区域东南部边缘，顺着风向流向北部，拉动中部深水区域形成逆时针环流；西北部浅水区域水流也受到风场影响，水流向北方，与中心补偿流同时作用，形成 2 个顺时针的环流；相较于 SSW 向风场, ENE 向风场下 B 区域流场变化更加复杂，由于受到 A 区域东部水流的影响，连接 A 与 B 区域航道水流流速要高于 SSW 向风场时的流速, B 区域的西北部流场受到航道内水流方向的影响，大环流被分割，形成了 3 个相近的小环流，东南部由于水深较浅，加之岛屿掩蔽作用影响，形成顺时针环流，环流速度大于该区域其他环流。对比 2 种风向对该区域的影响，风场对流场的作用形式相似，方向相反。

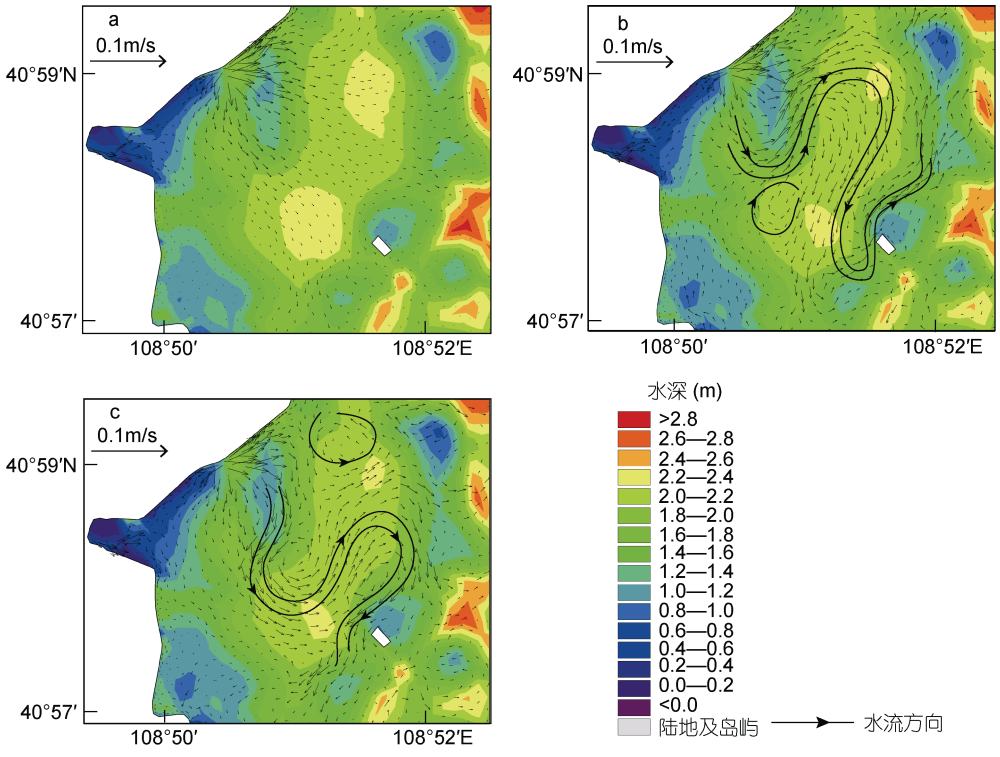



图 6　A 区域流场及环流示意图

Fig. 6　Flow field and circulation in area A

注: a: 无风; b: SSW 向; c: ENE 向

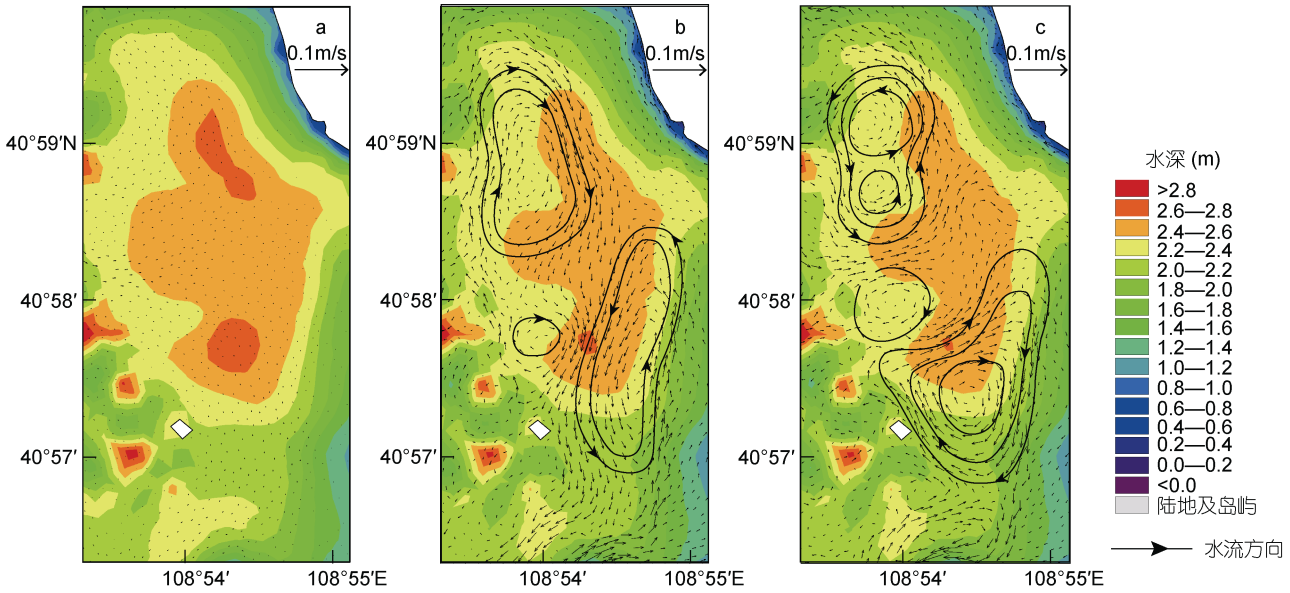



图 7　B 区域流场及环流示意图

Fig.7　Flow field and circulation in area B

注: a: 无风; b: SSW 向; c: ENE 向

C 区域(图 8)是乌梁素海较大的明水面区域, 地形呈中间低四周高的趋势, 无风条件下, 水流经过湖区中部芦苇区后, 流速极小, 近乎停滞。在 SSW 风场作用下, 东南部及西北部湖滨区沿湖岸方向流动, 由于空旷水面无芦苇阻碍, 沿岸流速较大, 经过中部芦苇区的水流顺着 C 区域北部的航道汇入中部补偿流

中，形成了 2 个方向相反的大尺度环流，西南部近岸区域水流受地形影响，形成了小尺度逆时针环流。ENE 风向对该区域影响形式与 SSW 风相类似，同样是东南部及西北部湖滨区流向变化带动中心形成环流，但由于东方向风向占主导，导致形成的环流形状不规则，面积较大，流速较小。X 点处由于芦苇遮挡，几乎不受风场影响，但是水流方向依然发生偏转，导致西北部形成的环流区域远小于东南部环流，这说明湖泊的边界形态也是改变水流方向的重要因素之一。

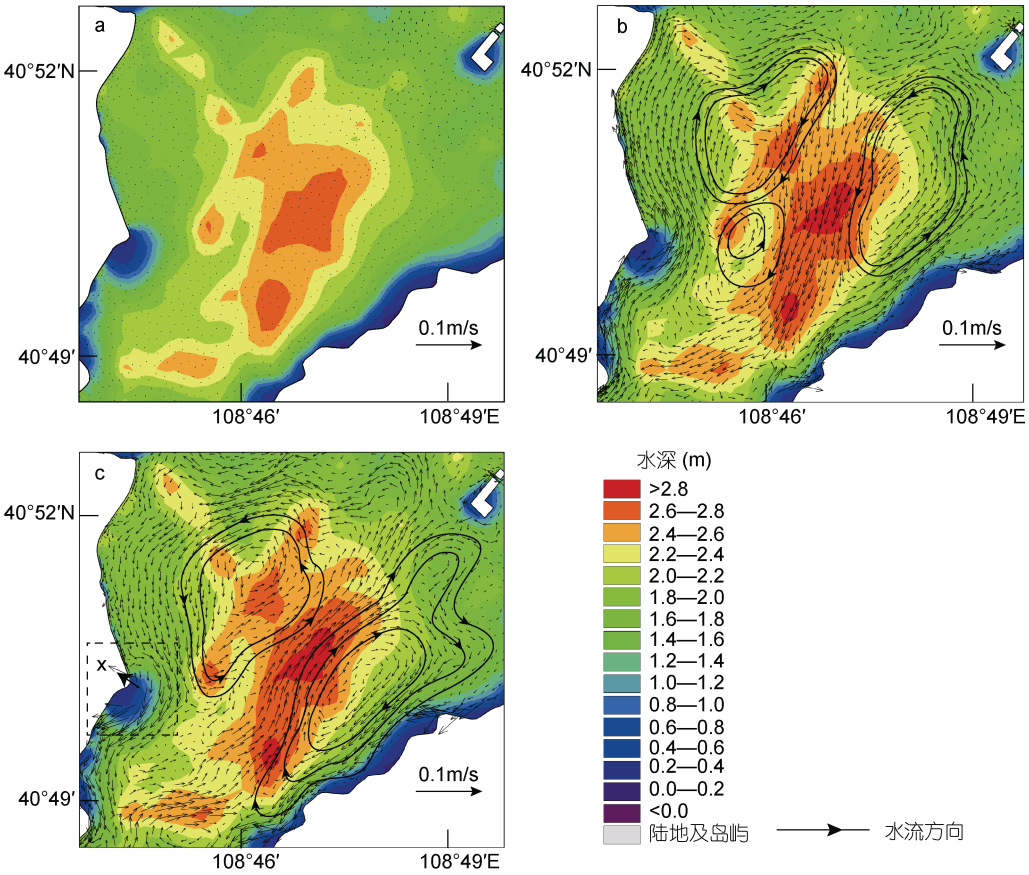



图 8 C 区域流场及环流示意图

Fig.8 Flow field and circulation in area C

注：a：无风；b：SSW 向；c：ENE 向；虚线框内 X 点处：芦苇区域

### 2.3 吞吐流对湖区流场的影响

吞吐流是湖水运动的主要驱动力之一，是影响湖泊水动力的关键因素，吞吐流量的变化对湖区流场的影响也比较大(姜恒志等, 2013; 吴青, 2017)。在得到各算例的流速矢量图(图 9)后，对比算例 1 和算例 2，湖区在仅增大吞吐流量情况下，湖区的水流形态基本未发生改变，只是水流的速度发生变化，吞吐流量增大，湖区流速增加。对比分析算例 2 和算例 3，在湖区常规的吞吐流作用下，加上定常风场驱动，湖区的水流结构发生明显变化，这说明湖区的水流形态受风场的影响较大，单一常规的吞吐流量不会使湖区形成环流；对比算例 3 和算例 4，发现增加了吞吐流量后，湖区整体流速增大，除了 A 区域靠近总排干渠口处的环流形状受到轻微影响，大部分环流区域位置及环流形状不发生改变，但环流的强度随着吞吐流量的增加而减弱。这说明在吞吐流量增大过程中，吞吐流驱动力制约了风生流驱动力，导致环流强度减弱。

## 3 讨论

本文利用相关资料和数据建立了乌梁素海水动力模型，针对乌梁素海湖区出现的高频率风向，模拟得到乌梁素海定常风作用下湖区的流速变化、环流的特点、形态等，同时研究了不同算例下流场形态与流速的变化情况。定常风场对于湖区流场作用的形式是单一的，然而真实的风向、风速是随时间空间持续变

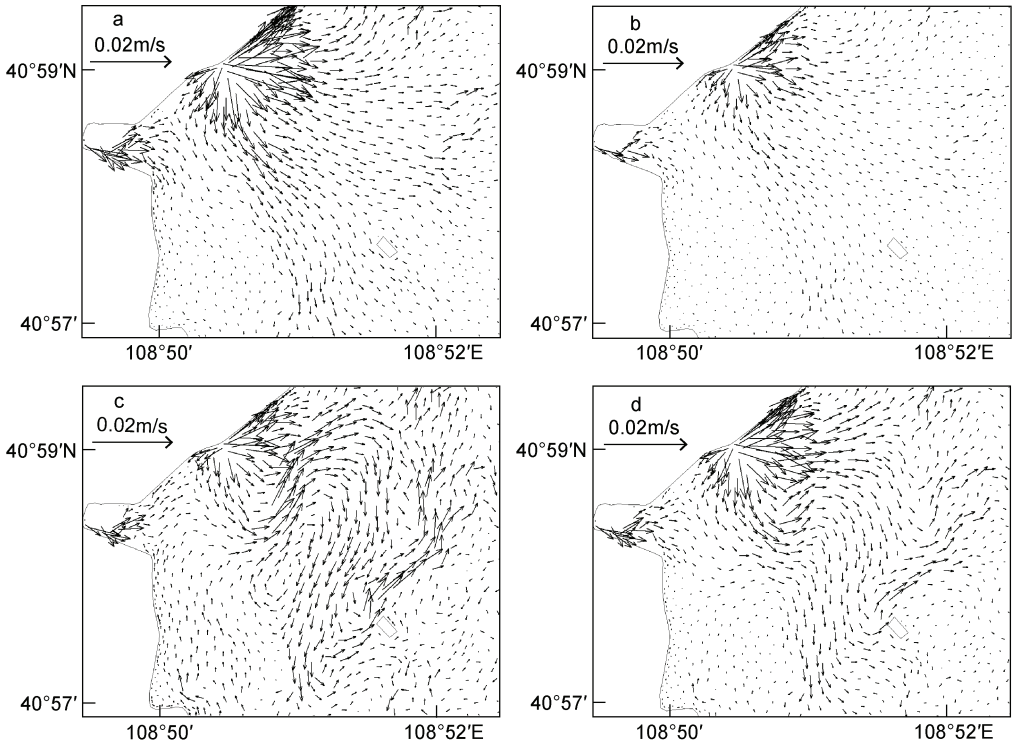



图 9　各算例流速矢量分布图

Fig.9　Velocity vector distribution in each algorithm case

注: a: 算例 1; b: 算例 2; c: 算例 3; d: 算例 4

化的, 并非如假设情况是一成不变的, 故实际的流场也是复杂多变的。通过实际风场作用与假设的定常风场作用下的流场形态进行对比可以得出: 随着时间推移、风场及吞吐流的变化, 实际流场的运动主要影响因子是风场, 吞吐流对湖泊的流场影响相对较小。本研究涉及的 SSW、ENE 定常风场下的流场形态只是实际情况中出现的风向中的 2 种, 乌梁素海在不同风场(实际风场)转换过程中, 没有因为风场的转换而影响流场产生特殊的变化(即不同的风场在稳定状态下会对应特定的流场形态)。实际流场的研究基本可以认为是不同时刻的风场对湖泊流场的影响研究。出现这种现象的主要原因是乌梁素海湖底地形平坦, 吞吐流量变化小, 即便是丰水期, 吞吐流量也不会有较大的变化, 不会影响湖区环流的位置, 形态等。已有研究表明(韩龙喜等, 2011), 湖泊风生流过程分为 3 个阶段, 为湖水流向与风向基本一致阶段、流向逐渐偏离风向的过渡阶段、形成环流的稳定阶段, 风场的持续时间也会对湖泊流场造成影响, 但是本文侧重研究特定风向、吞吐流量对湖流瞬时流态的影响, 极端情况下的风速和吞吐流量对流场的影响以及风场持续时间对流场的的影响本研究没有涉及到。

以往类似风场和吞吐流对湖泊流场影响研究也有很多, 如韩龙喜(2011)对高盐度艾比湖进行三维的风流数值模拟, 结果表明艾比湖沿岸水深较浅的水体受风应力的影响较大, 湖水流向与风向基本相同, 然而水深较大的区域容易形成与风向相反的补偿流。姚静(2016)模拟了无风、NE 和 SSW 3 种定常风向情景下的鄱阳湖水动力模型, 结果显示同一风场作用下, 不同湖区的环流结构、影响形式、持续时间也不尽相同, NE 向风场和 SSW 向风场产生的环流位置相近, 尺寸相近, 但是方向相反。在对狭长型雁鸣湖水动力模拟过程中, 赵正文等(2018)设置了几种吞吐流量来研究湖区流场的变化, 发现随着流量的增加, 湖区环流位置区域和形状变化不大, 流速大幅度增加, 但是环流的强度减弱。

本文结论与以上研究结论相类似, 即流场的方向受风场方向的影响较大, 同一区域不同风向会产生不同的流场形态, 空间分布不同的区域在同一风场作用下也有较大的差异, 湖区浅水区域最易受到风场的影响, 一般与风向一致, 湖中心深处往往形成流速较大但与风向相反的补偿流, 最终形成稳定的环流区域。随着吞吐流量增加, 湖区的流速增加, 不

会改变环流的位置，只有局部区域(排干渠口附近)的环流形态发生微小变化，但由于吞吐量流量的增加，增强了吞吐流的驱动力，制约了风驱动力，导致环流强度减弱。张亚(2014)模拟了 4 种入库工况下水库的水流特征，结果表明随着吞吐流量增加至极端量，流场逐渐由受风生流控制转变为吞吐流控制，与吞吐流方向一致的区域流速得到加强，方向不同的区域流速先减小后增加。本研究仅模拟了普通算例吞吐流作用下的水流形态，并未出现受吞吐流影响较大的区域，但可以推测，吞吐流量足够大时，吞吐流作用会完全取代风生流作用，极端情况下的流场形态会进行进一步研究。

风驱动力通过改变湖区环流形态，从而导致污染物在局部区域富集(Ishikawa *et al* , 2002; 周健等, 2018; Liu *et al* , 2019)。吞吐流通过水体交换，进而完成湖泊污染物质的扩散、迁移(姜恒志等, 2013)。蒋鑫艳(2019)等分析了 2014—2017 年乌梁素海冰封期和非冰封期营养盐的时空分布特征，得到湖区中部叶绿素 *a* 含量对全湖贡献最大的结论，叶绿素 *a* 富集区域与本文 A、B 区域基本一致；李兴(2011)等分析了乌梁素海水体总氮、总磷、叶绿素、化学需氧量等的时空分布，其中排干渠口附近总氮、总磷含量较高，叶绿素集中分布在湖区中部西大滩和东大滩区，这些污染物富集区域基本与本文环流区域位置高度吻合。以上研究结果表明本文得到的环流区域的分布是合理的，从水动力学角度解释了污染物空间分布的规律。乌梁素海风生流及吞吐流对湖区流场影响的研究为污染物富集的成因提供有力的理论支撑，有关于乌梁素海水质方面的数值模拟会在接下来的研究中进行。

## 4 结论

本文基于二维水动力模型，模拟了乌梁素海在定常风作用下湖区的流场形态，并对不同算例下吞吐流量对湖区流场的差异展开了对比分析，主要的结论如下:

1)乌梁素海在无风状态下时，湖区流速较小，出现大面积滞流区，单一的吞吐流无法满足乌梁素海水动力条件，风驱动力才是主要驱动力;

2)SSW、ENE 向 2 种风场作用下，A 区域对应环流形态呈中心对称，B、C 区域对应的环流位置、形态结构相似，但方向相反。浅水湖区最易受到风的影响，产生与风向相同的水流，深水区形成与风向相反的补偿流。

3)吞吐流量的增加会增大湖区整体流速。定常风场作用下，A 区域由于受到总排干渠的影响，环流形态随流量增加发生微小变化，风生流受到吞吐流影响，环流强度随流量增加而减弱。

4)风生流、吞吐流作用下会促使营养盐在局部区域富集，研究乌梁素海营养盐空间分布时，需要考虑风生流及吞吐流作用。

## 参 考 文 献


田伟东, 2016. 内蒙古乌梁素海湖泊健康评估. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 6—10

田伟东, 贾克力, 史小红等, 2016. 2005-2014 年乌梁素海湖泊水质变化特征. 湖泊科学, 28(6): 1226—1234

李 兴, 2009. 内蒙古乌梁素海水质动态数值模拟研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 23—24.

李一平, 邱 利, 唐春燕等, 2014. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析. 中国环境科学, 34(2): 410—416

李 兴, 杨乔媚, 勾芒芒, 2011. 内蒙古乌梁素海水质时空分布特征. 生态环境学报, 20(Z2): 1301—1306

李一平, 唐春燕, 余钟波等, 2012. 大型浅水湖泊水动力模型不确定性和敏感性分析. 水科学进展, 23(2): 271—277

吴 青, 2017. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水面的影响研究. 江西: 江西师范大学硕士学位论文, 19—24

吴乔枫, 蔡 奕, 刘曙光等, 2018. 基于植被分布的河道糙率分区及率定方法. 水科学进展, 29(6): 820—827

张 亚, 2014. 浅水型富营养化水库三维水动力及水质数值模拟研究与应用. 天津: 天津大学博士学位论文, 2—8

陈友媛, 胡广鑫, 杨世迎等, 2012. 北方浅水湖泊冬季结冰对风生流的影响. 水科学进展, 23(6): 837—843

周 健, 秦伯强, 2018. 风浪对湖泊浮游生物影响的研究进展. 水科学进展, 29(2): 293—300

武春芳, 徐明德, 李 璐等, 2014. 太原市迎泽湖富营养化控制的模型研究. 中国环境科学, 34(2): 485—491

姚 静, 张 奇, 李云良等, 2016. 定常风对鄱阳湖水动力的影响. 湖泊科学, 28(1): 225—236

赵锁志, 2013. 内蒙古乌梁素海湖水及底泥营养元素和重金属污染及其环境效应研究. 北京:中国地质大学博士学位论文, 20—21

赵振兴, 2013. 明渠均匀流 见: 赵振兴主编. 水力学(第二版) 北京: 清华大学出版社, 170—180

赵正文, 2018. 城市人工湖水动力特性与水质变化规律研究. 西安: 西安理工大学硕士学位论文, 44—48

赵正文, 冯民权, 高 峰, 2018. 风场和吞吐流对狭长型雁鸣湖流场的影响. 水电能源科学, 36(12): 9—12

姜恒志, 崔 雷, 石 峰等, 2013. 风场、地形和吞吐流对太湖流场影响的研究. 水力发电学报, 32(6): 165—171

唐昌新, 熊 雄, 邬年华等, 2015. 长江倒灌对鄱阳湖水动力特征影响的数值模拟. 湖泊科学, 27(4): 700—710

蒋鑫艳, 李畅游, 史小红等, 2019. 乌梁素海叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系. 生态环境学报, 28(5): 964—973

韩龙喜, 陆东燕, 李洪晶等, 2011. 高盐度湖泊艾比湖风生流三维数值模拟. 水科学进展, 22(1): 97—103

Chen F, Zhong C, Brett M T *et al*, 2020. The importance of the wind-drag coefficient parameterization for hydrodynamic modeling of a large shallow lake. Ecological Informatics, 59: 101—106

Gao X, Xu L, Zhang C *et al*, 2015. Modelling the effect of water diversion projects on renewal capacity in an urban artificial lake in China. Journal of Hydroinformatics, 17(6): 990—1002

Ishikawa K, Kumagai M, Vincent W F *et al*, 2002. Transport and accumulation of bloom-forming cyanobacteria in a large, mid-latitude lake: the gyre-Microcystis hypothesis. Limnology, 3(2):87—96

Liu X D, Li L Q, Wang P *et al*, 2019. Numerical simulation of wind-driven circulation and pollutant transport in Taihu Lake based on a quadtree grid. Water Science and Engineering, 12(2): 108—114

Yao J, Li Y L, Zhang D *et al*, 2019. Wind effects on hydrodynamics and implications for ecology in a hydraulically dominated river-lake floodplain system: Poyang Lake. Journal of Hydrology, 571: 103—113

# THE INFLUENCES OF UNIFORM WIND AND THROUGHPUT FLOW ON THE FLOW FIELD OF WULIANGSU LAKE

WANG Zhi-Chao[1], SHI Qing-Song[1], LI Xing[2], LI Wei-Ping[1], YANG Wen-Huan[1], YU Ling-Hong[1]

(1. *School of Energy and Environment*, *Inner Mongolia University of Science &Technology*, *Baotou* 014010, *China*; 2. *Inner Mongolia Water Saving Agricultural Engineering Research Center of Inner Mongolia Normal University*, *Huhehaote* 010020, *China*)

**Abstract**　Wind field and throughput flow are the main driving forces of the shallow lake motion, which affect the migration and transformation of pollutants in the lake. In this study, a hydrodynamic model of the Wuliangsu Lake is constructed based on a two-dimensional unstructured grid. The effects of uniform wind and throughput flow on the flow field of the Wuliangsu Lake are investigated by comparing the direction, distribution and form of the lake flow under the effect of uniform wind with those under the condition of no wind, and simulating the differences of flow velocity and circulation structure in the lake area under the effect of throughput flow in different cases. The results show that the wind field increases the flow velocity of the lake, and the influence area is mainly in the west beach area, the east beach area and the bright water area in the south of the lake, producing obvious circulation, and the wind field is the main driving force of the Wuliangsu Lake; the location and morphological structure of the circulation produced in typical areas under the action of the wind field in SSW and ENE are similar, and the direction is opposite; the increase of the throughput flow will increase the overall flow velocity in the lake area, which has less influence on the flow field morphology and structure in the lake area; under the uniform wind conditions, the increase of throughput flow (in a certain range) will lead to the weakening of the circulation intensity. The results of the study lay the foundation for the study of nutrient and pollutant transport patterns in the Wuliangsu Lake.

**Key words**　Wuliangsu Lake;　uniform wind;　throughput flow;　hydrodynamic simulation