DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0182 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-11

基于水龄分布特征的突发水污染水质演变快速预测方法——以蠡湖为例

李嘉霖[1,2,3],王玲玲[1,2,3],徐项哲[4],赵永刚[5],季益柱[5],徐津[1,2,3],胡礼涵[1,2,3],朱海[1,2,3]

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,河海大学,江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 3. 水利部水循环与水动力重点实验室,河海大学,江苏 南京 210098; 4. 无锡德林海环保科技股份有限公司,江苏 无锡,214000; 5. 中水淮河规划设计有限公司,安徽 合肥,230601)

摘要: 为了分析了不同活水方案下蠡湖水龄的时空分布特征,并应对水体突发水污染问题,(进行模拟研究),并提出了一种基于水龄的水质演变快速预测方法。模拟结果表明,选择由长广溪节制闸进水、环湖河闸和曹王泾闸出水、流量配比为2:1的活水方案,可有效降低蠡湖全湖的平均水龄,并最大化活水区面积。综合分析水龄分布规律,总结并提出了一种基于水龄的水质演变快速预测方法;该方法利用水龄分布的模拟成果,可快速确定污染物的输移路径和到达时间,大幅缩短了预测时间,为突发水污染事故的应急处置提供了有效支撑。研究结果表明,该方法的预测结果与传统水动力-水质耦合模型的模拟成果相吻合,且具有更为快速且便捷的特点。成果对于推动各类水体的水质安全管理具有重要的理论和实践价值。

关键词: 水龄;突发水污染;水质快速预测;水安全;蠡湖

中图分类号: TV213.3 **文献标志码:** A

A Rapid Prediction Method for Water Quality Evolution of Sudden Water Pollution Based on Water Age Distribution Characteristics – A Case Study of Lihu Lake

LI Jialin[1,2,3], WANG Lingling[1,2,3], XU Xiangzhe[4], ZHAO Yonggang[5], JI Yizhu[5], XU Jin[1,2,3], HU Lihan[1,2,3], ZHU Hai[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Hydrology－Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Key Laboratory of Hydrologic－Cycle and Hydrodynamic－System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Wuxi Delinhai Environmental Protection Technology Co., Ltd, Wuxi, 214000, China;
5. China Water Huaihe Planning, Design and Research Co., Ltd., Hefei 230091, China)

Abstract: This study analyzed the spatial and temporal characteristics of water age in Lihu Lake under different

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 李嘉霖(2000—),男,硕士研究生,主要从事水力学数值模拟研究。E-mail:221302010009@hhu.edu.cn

通信作者: 朱海(1986—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:h.zhu@hhu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202600);国家自然科学青年基金(52309086);江苏省水利科技项目(2023013);江苏省水利科技项目(2022061)

本文引用格式: 李嘉霖,王玲玲,徐项哲,等.基于水龄分布特征的突发水污染水质演变快速预测方法——以蠡湖为例[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-11.

Citation: LI Jialin, WANG Lingling, XU Xiangzhe, et al. A Rapid Prediction Method for Water Quality Evolution of Sudden Water Pollution Based on Water Age Distribution Characteristics – A Case Study of Lihu Lake[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-11.

active water strategies, and a rapid prediction method for water quality evolution was proposed based on water age to address sudden water pollution problems. The results indicated that by selecting the active water strategy with inflow from the Changguangxi Sluice, outflow from the Huanhu Sluice and Caowangjing Sluice with a flow ratio of 2:1, the average water age of the entire lake can be effectively reduced, and the area of the active water zone can be maximized. Based on the simulation results, a rapid prediction method for water quality evolution was proposed using the water age distribution. This method can rapidly determine the transport path and arrival time of pollutants by utilizing the simulated water age distribution, significantly shortening the prediction time and providing effective support for emergency response to sudden water pollution accidents. The study results demonstrated that the predictions of this method are consistent with the simulations results of traditional hydrodynamic-water quality coupled models, and the method has a more rapid and convenient approach. The findings have important theoretical and practical value for promoting the water quality safety management in various water bodies.

Key words: Water age; Sudden water pollution; Rapid water quality prediction; Water security; Lihu Lake

平原地区浅水湖泊作为区域社会经济发展的重要水源地,存在各种不确定因素引发的水污染风险。突发水污染可在短时间内严重影响水质,对公众健康和生态安全构成威胁。如何快速有效地模拟并预测突发水污染事故影响下的水质演变,是应对突发水污染事件的关键一环。

针对湖库、河道等水体的突发水污染问题,前人通常以水动力模型为基础,根据预设情景模拟预测不同类型污染物的输移扩散过程:陈瀚等[1]使用MIKE11模型建立淮河中游段的水动力-水质模型,分析了不同代表性突发水污染情景下污染物到达取水口的时间、浓度峰值及影响历时;黄轶康等[2]使用EFDC模型建立了长江下游南京段的溢油模型,确定了对下游保护区最不利的突发污染情景;石宝山[3]等使用GAST模型模拟了暴雨山洪及溃坝洪水引起的突发水污染事故中的污染物输移;Yan等[4]使用MIKE21模拟了大伙房水库上游浑河段的突发水污染事故,根据水质要求确定了突发水污染预警值;徐月华[5]建立了南四湖的水动力-水质模型,以污染物到达出水口的时间为控制因子,在湖泊主航道上划分了控制单元,为突发水污染的应急处置提供决策依据。系列研究为应对突发水污染事件提供了方法与技术支持。

突发水污染处置过程中,需要以最快速度控制水污染的影响,因此污染物的输移时间是必须考虑的首要因素。水龄可用于描述突发水污染处置的成效。水龄是指水质点从离开源后到达特定位置所需的时间[6],水龄能够反映水体交换效率的空间异质性,并能揭示水体水动力特性,自被提出以来,已应用于多项实际工程。Deleersnijder等[6]使用水龄表征水体的交换效率,反映水动力场对物质输运的影响;Li等[7]使用EFDC模型,以水龄为指标评估了“引江济太”工程对太湖水体更新的影响;戚文等[8]建立了天镜湖的三维水量-水龄-污染物颗粒追踪模型,分析了天镜湖的水动力优化调控方案;李金华等[9]基于EFDC模型,以水龄为指标评估了“引江济星”工程的调水效益;黄春琳等[10]分析了不同风场作用下的太湖水龄季节性分布;Zhang等[11]用水龄解释水质现象,分析了滇池水龄和水质的响应关系;Gai等[12]基于Delft3D模型,利用水龄分析了香溪河库湾水体垂向更新的时空分布。

目前,水龄多用于表征水体更新、引调水工程对水体水质的影响描述。为了研究突发水污染问题中污染物处置成效及其时间效应,本文以太湖流域浅水湖泊蠡湖为例,引入水龄概念,构建了蠡湖水动力-水质-水龄耦合模型,分析不同活水方案下蠡湖水龄的时空分布特征;在此基础上,针对蠡湖可能的突发水污染事件,提出了一种基于水龄的水质演变快速预测方法。该方法可以快速确定污染物的输移路径和影响时间,可为应急处置提供有效支持。本文研究成果为类似湖库突发水污染应急处置、区域水环境改善和水安全管理提供了理论依据和技术方法支撑。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

蠡湖位于江苏省无锡市区西南郊,是太湖北部的平原浅水湖泊[13],东西长约6km,南北宽0.3~1.5km,面积约8.6km^2,正常蓄水位3.3m,常水位时湖体周长约为21km。研究区位图及蠡湖地形示意图如图1所示。自20世纪60年代以来,围湖造田、

水产养殖等因素造成蠡湖水生态环境逐步恶化，一度成为太湖地区富营养化最为严重的湖泊。经多年治理，蠡湖的水质已有明显的改善。根据规划，环湖区域将被建设成为国际化、生态化的“蠡湖未来城”，蠡湖作为未来城的水源地，其水生态环境需满足极高的要求。

蠡湖大桥全桥长750 m，宽33 m，是跨越蠡湖的一座特大型桥梁[14]，连接城市南部环太湖高速和北部京沪高速，是无锡西部南北向重要的快速通道之一。桥梁存在交通事故导致蠡湖突发水污染的风险[15-16]，可造成湖泊水质突然超标，进而威胁“蠡湖未来城”的用水安全。

为实现活水畅流，无锡市政府计划连通太湖与蠡湖。根据蠡湖与太湖的区位关系，太湖来水可从南侧及西侧进入蠡湖，再从东侧或/和西侧河道进入京航大运河。不同的活水畅流路径、不同的流量规模，蠡湖将呈现不同的水龄分布特征，对于蠡湖大桥处可能发生的突发水污染也可产生不同的影响。

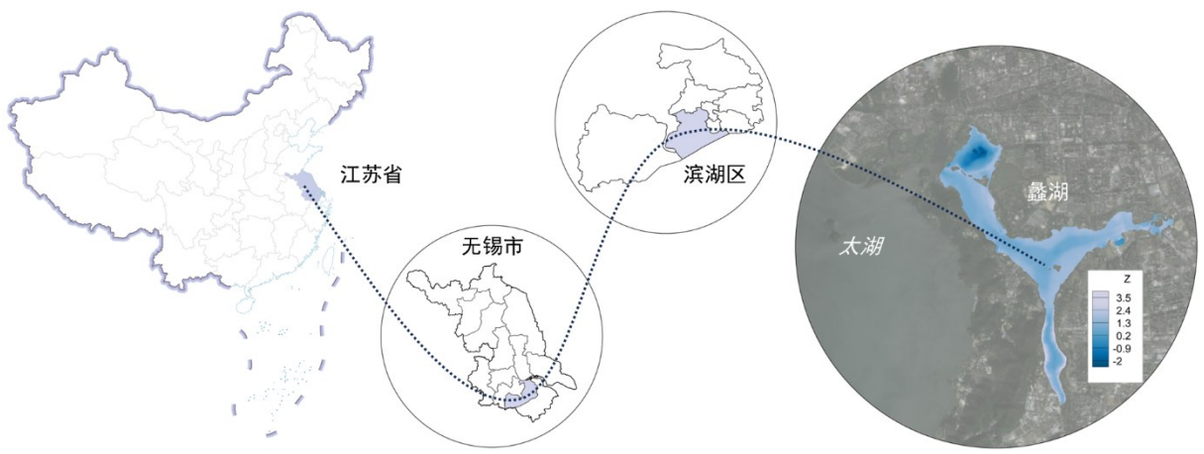


图1 研究区域区位图及蠡湖地形示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the study area and topography of Lihu Lake

1.2 数学模型

1.2.1 水动力控制方程

蠡湖是典型的浅水湖泊。本文采用自研的水深平均浅水模型实现水动力模拟[17]，该模型已成功应用于洪泽湖的水沙模拟计算中[18]。

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial E(U)}{\partial x}+\frac{\partial G(U)}{\partial y}=S(U) \tag{1}$$

式中：$U=(h,hu,hv)$为守恒变量，包括水深及x和y方向的单宽通量；h为水深；u和v分别是x和y方向的深度平均速度分量；$E(U)$和$G(U)$为界面通量；$S(U)$为源项。通量及源项矢量表达如下：

$$E(U)=\begin{pmatrix} hu \\ hu^2+\dfrac{gh^2}{2} \\ huv \end{pmatrix},G(U)=\begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2+\dfrac{gh^2}{2} \end{pmatrix},S(U)=\begin{pmatrix} 0 \\ gh\left(S_{0x}-S_{fx}\right)+S_{wx} \\ gh\left(S_{0y}-S_{fy}\right)+S_{wy} \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中：S_{0x}及S_{0y}为底坡源项；S_{fx}及S_{fy}为摩阻源项；S_{wx}及S_{wy}为风应力源项。

本文采用基于非结构化网格的有限体积法对上述方程进行离散，选用三角形网格以适应地形及边界。变量定义在单元中心，单元的外法向向量$n=(n_x,n_y)^T$，在三角形控制体上对二维浅水方程进行积分，并利用散度定理，将其转化为沿控制体边界的线积分[19]：

$$\iint_{\Omega}\frac{\partial U}{\partial t}d\Omega=-\int_{S}\left[E(U)n_x+G(U)n_y\right]ds+\iint_{\Omega}S(U)d\Omega \tag{3}$$

式中，S为控制体Ω的边界，$d\Omega$和ds分别为面积分和线积分微元。

假定各控制体内水体要素均匀分布，对上式时间项采用前插格式，记$F_n=E(U)n_x+G(U)n_y$，得到的基本数值解为：

$$U_i^{n+1}=U_i^n-\frac{\Delta t}{\Delta V_i}\sum_{j=1}^{m}F_{nj}\Delta l_j+\Delta t\bar{S} \tag{4}$$

式中，Δt为时间步长，ΔV_i为单元i的面积，F_{nj}为通过单元i第j条边的通量，Δl_j为单元i第j条边的边长，$\bar{S}$为源项的单元积分值。

1.2.2 水质控制方程

水质模型以对流扩散为基础,用于模拟水体中物质的输移、扩散及降解:

$$\frac{\partial hC}{\partial t}+\frac{\partial huC}{\partial x}+\frac{\partial hvC}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(hD_c\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hD_c\frac{\partial C}{\partial y}\right)-hk_pC \tag{5}$$

式中:C指平均浓度,k_p是线性衰减率,D_C是扩散系数。

1.2.3 水龄控制方程

根据水龄的定义,水体入口或上游边界处的水龄为0,域内各点水龄越大说明该位置与外界的水体交换能力越弱。本文中,用水龄描述湖泊水体与外部水体的交换强度、点源释放的污染物输运至水体某特定位置所需的时间。选用基于组分水龄与停留时间理论(the Constituent-oriented Age and Residence time Theory,CART[6])的水龄计算方法,该方法能给出水龄的时空分布规律,在水体更新研究中得到了广泛应用。

利用两个物理量$C(t,x,y)$及$\alpha(t,x,y)$分别表示新鲜水体在研究区域内部某控制体中的示踪剂浓度及水龄富集度,满足以下的控制方程[6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\nabla(\vec{u}C)-\nabla(K\nabla C)=0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\nabla(\vec{u}\alpha)-\nabla(K\nabla \alpha)=C \tag{7}$$

式中,$\vec{u}$为水平流速,K为水平扩散系数,t与x,y分别为时间、空间坐标,τ为水质点离开源后到达控制体时所经历的时间。

综上,根据定义,该控制体的水龄a可由公式$a=\alpha/C$计算得出。对于较大尺度的港口及湖泊,水龄可以选取天(day)作为单位。考虑到蠡湖面积较小,本文选取小时(hour)作为水龄的单位。

2 模型建立

2.1 模型范围、网格划分及地形数据获取

本文研究范围为蠡湖,出入流边界共有4个,分别为蠡湖西侧入流边界五里湖节制闸、蠡湖南部入流边界长广溪节制闸、蠡湖西侧出流边界环湖河闸、蠡湖东侧出流边界曹王泾闸(见图2)。采用非结构三角形网格剖分湖区,共包括8440个节点,15655个网格。本文所采用的湖泊地形数据为笔者所在团队使用声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler,ADCP)于2023年3月采用走航法获得的实测数据,仪器深度测量范围为0.2m至15m,分辨率为0.001m,准确度为1%。在8.6km^{2}的湖面上设定“几”字形折返测量的路线,相临路线间距约为50m,测量里程约为94km。

2.2 模型参数率定及验证

使用2023年8月28日太湖流域管理局水文局(信息中心)发布的犊山闸实时气象资料及实测水位、流速率定模型糙率,当日测量期间风速风向如表1所示。笔者所在团队通过声学多普勒流速剖面仪,采用走航法对蠡湖7个断面的流速、水深、水位进行实时测量,断面位置如图2所示,各断面测量时间如表2所示。

通过率定,水动力模型中蠡湖湖区糙率设置为0.021。图3为断面1、3、5的流速、水深验证结果,可以看出总体上全湖水动力模拟结果较为合理。

采用均方根误差法(the Root Mean Squared Error,RMSE)对模拟结果进行误差分析。均方根误差是一种衡量模拟值与实际值之间差异的统计量,它是一种平均误差,用于度量预测模型的精确性。RMSE的值越小,表示模型的预测越准确。各断面计算结果的均方根误差如表3所示。

由上述结果可知,本文所构建的水动力模型精度较高,糙率取值基本合理。因此,本模型可用于模拟活水及风场共同作用下的蠡湖水动力过程。

3 蠡湖水龄分布特征分析

3.1 不同活水工况设置

为比较不同入湖通道布局、入湖流量等因素对水龄分布的影响,以选取最优的活水方案,共设置六组工况模拟蠡湖水龄分布。工况1-5针对不同入湖通道布局,旨在选择蠡湖水龄最短,活水面积最大的活水方案。在选定最优入湖通道布局的基础上,工况6研究不同引水流量下的水龄分布。工况设置如表4所示。方案中设置多个入/出流口时总流量均分。

3.2 不同活水工况下水龄分布

图4为五个不同活水工况(工况1~5)蠡湖水龄空间分布云图。模拟结果显示五个工况的全湖平均水龄分别为229.3h、197.3h、204.5h、255.3h、168.2h。受制于湖区平面形态的影响,各工况均存在部分水动力极弱、水体交换困难的区域。为方便讨论,将水龄小于450h的区域定义为活水区。工况1~5的活水区面积及占全湖面积比分别为6.96km^2(80.93%)、7.68km^2(89.33%)、7.12 km^2(82.91%)、5.22 km^2(60. 71%)、8.48 km^2(98.56%),参与水体交换的活水区平均水龄为165.2h、164.2h、147.9h、



表1 犊山闸处风速风向

Table1 Wind speed and direction at Dushan Sluice

时间	风速	风向
10:30	4.7 m/s	225°
11:30	1.4 m/s	315°
12:30	2.2 m/s	270°
13:30	3.3 m/s	315°
14:30	2.5 m/s	315°
15:30	3.5 m/s	315°

表2 各断面测量时间

Table2 Measurement time for each cross-section

断面名称	测量时间
断面1	10:36:35-10:50:16
断面2	11:10:27-11:25:45
断面3	12:08:41-12:20:28
断面4	13:51:03-14:09:29
断面5	14:20:49-14:30:55
断面6	14:49:07-15:03:50
断面7	15:16:17-15:34:23

图2 研究区域概况及实测断面位置示意图

Fig.2 Schematic diagrams of study area and measurement cross-sections

110.9h、163.8h。数值模拟结果如表5所示。

由表5结合水龄分布云图可以得出：工况5是蠡湖全湖平均水龄低、水体交换能力强的较优方案，工况2次之，而工况4的活水方案会导致蠡湖有较多水域无法参与水体交换，故工况4不适合用于常规情形下全湖的水体更新。同时，该工况的活水区平均水龄明显低于其他工况，说明该方案活水区域内物质输运能力强，这将有利于应对可能发生蠡湖东侧的突发水污染。

由上述分析可知，由长广溪节制闸入湖、环湖河闸及曹王泾闸出湖的工况5方案为降低蠡湖水龄的较优方案，但由云图可以看出，该工况蠡湖西侧的水龄大于蠡湖东侧水龄，这是由于蠡湖西侧的活水线路上存在岛屿阻碍，水进入西北部后流速降低。为了优化方案，进一步研究工况5情况下的最优活水配比，以工况5为基础，设计了以下方案。

经计算，四种工况蠡湖平均水龄分别为168.2h、163.2h、164.1h及165.8h，活水区水龄分别为163.8h、161.7h、161.9h及162.1h，对比图如图5所示。四种工况的活水面积占比分别为98.56%、99.50%、99.14%及98.78%，基本可以达到全湖活水的状态。可以看出，工况5-1即流量配比为2:1的方案，其全湖平均水龄及活水区平均水龄均低于其他方案，故该方案为最优活水方案。

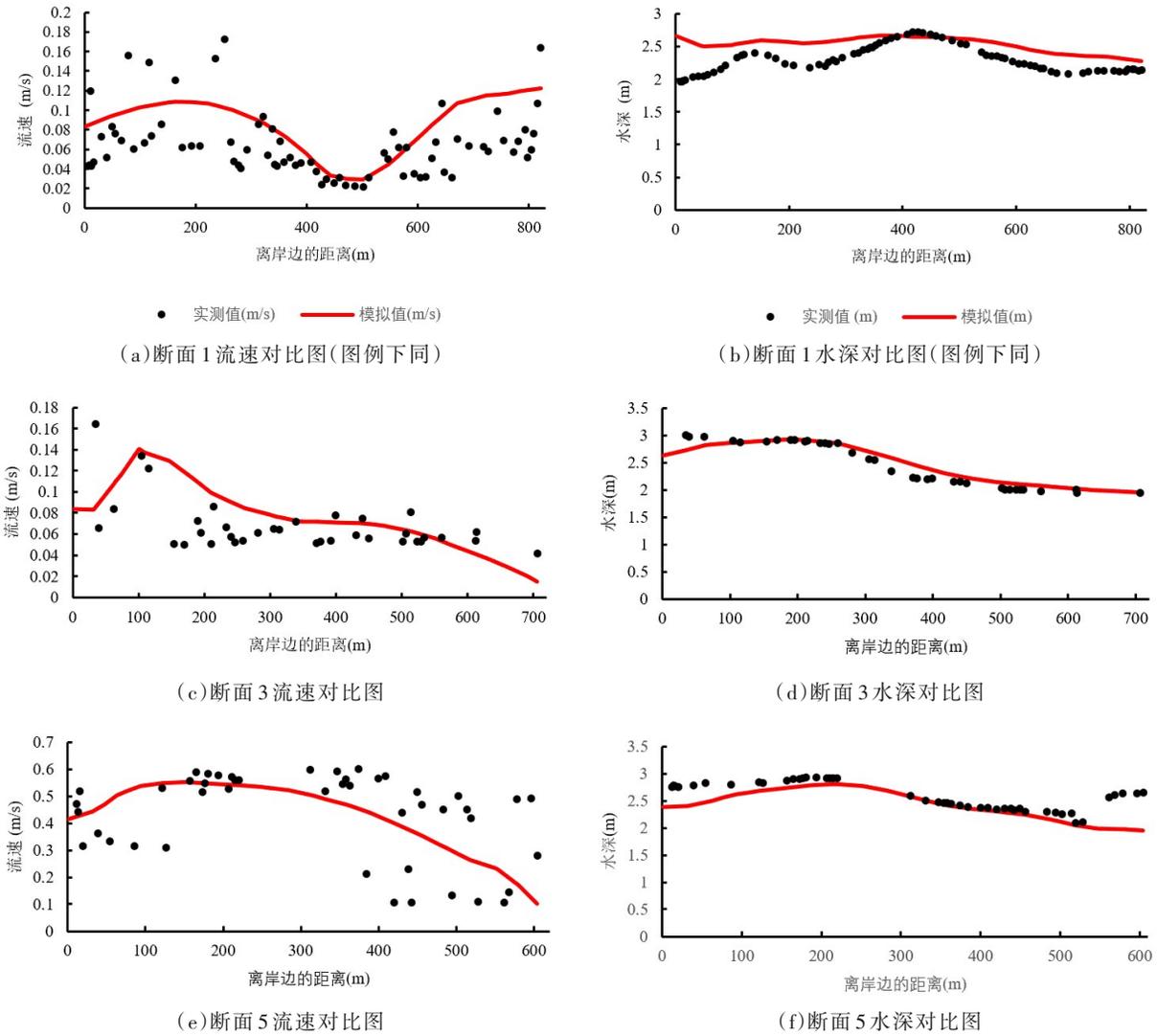
为进一步探究流量的水龄分布的影响，以流量配比为2:1的南进东、西出方案为基础，分析不同流量下的蠡湖全湖平均水龄。为便于讨论，将单位流量增加引起的水龄变化值定义为水龄变化率，单位为h/(m^3s^{-1})。活水流量以5m^3/s为增量，从10 m^3/s增加到30m^3/s时，水龄分别减小了49.2h、43.1h、18.3h及7.5h，对应的水龄变化率分别为9.84 h/(m^3s^{-1})、8.62 h/(m^3s^{-1})、3.66 h/(m^3s^{-1})及1.5 h/(m^3s^{-1})。活水流量与全湖平均水龄的关系如图6所示。可以看出，蠡湖水龄随着活水流量的增加而减小，但减小趋势逐步放缓，水龄变化率在20m^3/s后显著降低，说明20m^3/s为较优的活水流量阈值。

综上，在常规情况活水时，以蠡湖平均水龄为研究目标，可选取长广溪节制闸入湖，环湖河闸及曹王泾闸出湖、流量比2:1的活水方案，活水流量不大于20m^3/s。

4 突发水污染水质演变快速预测方法

4.1 工况设置

蠡湖是跨越蠡湖的一座特大型桥梁，其位置如图2所示。桥梁存在交通事故导致蠡湖突发水污染的风险。本文假设一辆装载了2吨的Ⅲ类危险品运输车在蠡湖大桥中间发生倾覆，运输物为含苯危化



(a)断面1流速对比图(图例下同)　(b)断面1水深对比图(图例下同)

(c)断面3流速对比图　(d)断面3水深对比图

(e)断面5流速对比图　(f)断面5水深对比图

图3　断面1、3、5流速及水深计算与实测结果对比图

Fig.3　Comparison of simulated and measured values of flow velocities and water depths at cross-sections 1, 3, and 5

表3　各断面模拟值与实测值对比及断面1、3、5计算结果均方根误差表

Table3　Comparison of simulated and measured values, and RMSE of calculated results for cross-sections 1, 3, and 5

	平均值对比		均方根误差		
	模拟平均值	实测平均值	断面1	断面3	断面5
水深	2.49m	2.47m	0.010967	0.005921	0.022331
流速	0.253m^3/s	0.248m^3/s	0.084118	0.024728	0.040708

品,其密度与水体接近,浓度为1kg/L,泄露速度为10L/s,污染物于短时间内排放完毕。

由表5可知,活水工况4的活水区平均水龄较低,说明在该方案活水区域内物质输运能力强,有利于应对可能发生在蠡湖东侧的突发水污染。蠡湖大桥位于蠡湖东侧,位于工况4的活水区,因此本文选择工况4的活水方案将污染物排出蠡湖。

4.2　污染物输移扩散数值模拟

在突发水污染发生后,污染团随流场向出湖口方向运移。10小时后污染团核心浓度下降至0.5 kg/L,20小时后污染团核心浓度下降至0.12 kg/L。在第24小时左右,污染团核心区到达曹王泾闸附近并逐渐排出,但受限于地形,污染团被湖中岛屿分散,第30小时高浓度污染团排出蠡湖,第50小时污染团已基本排出,仅有极少量滞留,至第70小时完全排出。突发污染类苯化合物输移云图如图7所示。

4.3　基于水龄的水质演变快速预测

水龄可以在时间层面上量化流场对水体物质输运的作用。一旦确定了流场,便可根据水龄分布图直观地确定物质输运所需时间。在处理本文拟

表 4 计算工况设置

Table4 A summary of simulation scenarios

工况		总引水流量/(m^3/s)	入流口	出流口
编号	方案内容			
1	西侧入湖、东侧出湖	15	五里湖节制闸	曹王泾闸
2	西侧及南侧共同入湖、东侧出湖	15	五里湖节制闸及长广溪节制闸	曹王泾闸
3	南侧入湖、西侧出湖	15	长广溪节制闸	环湖河闸
4	南侧入湖、东侧出湖	15	长广溪节制闸	曹王泾闸
5	南侧入湖、东侧及西侧共同出湖	15	长广溪节制闸	环湖河闸及曹王泾闸
6	判断不同流量的影响	10/15/20/25/30	长广溪节制闸	环湖河闸及曹王泾闸

表 5 活水工况 1~5 的水龄分布

Table5 Water age distributions under regulated flow scenarios 1-5

工况编号	全湖平均水龄(h)	活水区面积(km^2)	活水面积占比	活水区平均水龄(h)
1	229.3	6.96	80.93%	165.2
2	197.3	7.68	89.33%	164.2
3	204.5	7.12	82.91%	147.9
4	255.3	5.22	60.71%	110.9
5	168.2	8.48	98.56%	163.8

定的突发水污染事件中，选定上文中工况 4 的流场绘制流线，根据经过污染事故发生点的流线（恒定流场情况下即为迹线），计算路径起点（即污染事故发生点）与流线上若干点位的水龄，即可得到污染物的输移时间，水质演变快速预测分析如图 8 所示。

通过该图，可直观的看出污染物的输移路径，并可根据水龄的分布推断所需时间，进而可对水质演变的时间进行快速预测。随着突发污染团受地形影响后分散，通过流速场绘制流线，可以看出污染团会通过三种可能的路径到达出湖口，污染事故发生点处水龄为 134.95h，三种路径终点处水龄分别为 168.59h、186.77h、202.55h，故三种路径用时分别为 33.64h、51.82h、67.60h。这与 4.2 节中突发污染类苯化合物输移模拟及图 7 所反映的时间基本吻合。此方法有效减少了前人针对“水质控制单元”而进行的大量工况计算[5]，一旦出入流方案确定，即可根据水龄分布图进行水污染风险评估。基于水龄的水质演变快速预测方法流程如图 9 所示。

结论

本文通过建立的二维水动力及水龄模型，计算了不同活水工况下蠡湖的水龄分布，基于水龄遴选了最优的活水方案，并提出了一种基于水龄的水质演变快速预测方法，对可能发生的突发水污染事件进行了模拟及预测，得到了以下结论：

（1）水动力模型经实测数据率定后，水深及流速模拟值与实测值吻合良好，模型具有较高精度，可较准确的模拟水动力过程及水龄分布。

（2）选择由长广溪节制闸入湖、环湖河闸及曹王泾闸出湖、环湖河闸和曹王泾闸流量配比为 2:1 的活水方案，有利于降低蠡湖全湖的平均水龄，获得最大的活水区面积。考虑活水流量与全湖平均水龄响应关系，入湖总流量不应大于 20m^3/s。

（3）选择由长广溪节制闸进水、曹王泾闸出水的活水方案，可获得最低的活水区平均水龄，可应对发生在蠡湖大桥的突发水污染事故。

（4）提出了一种基于水龄的水质演变快速预测方法，可根据计算得到的水龄分布快速推断污染物的输移路径和到达时间，大幅缩短了预测时间，具有较好的预测效果，为突发水污染事故的应急处置提供了有效支撑，并可为类似河湖水体的突发水污染评估及预测提供参考。

参考文献：

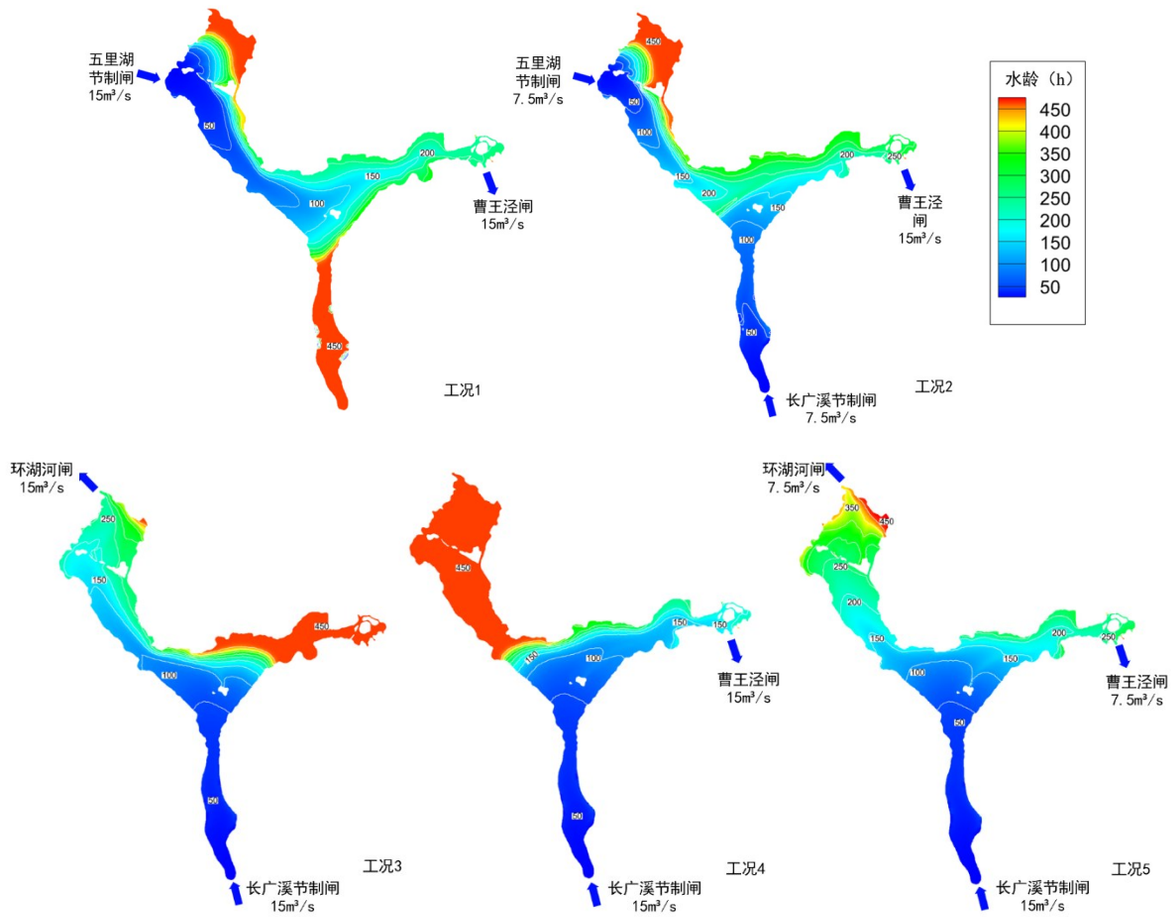


图4 各活水工况下的蠡湖水龄分布

Fig. 4 Water age distributions in Lihu Lake for all scenarios

表6 南侧入湖、东侧及西侧共同出湖系列工况设置

Table 6 A summary of simulation scenarios for inflow from the south side, and combined outflow from east and west sides

工况		总引水流量/(m^3/s)	环湖河闸流量/(m^3/s)	曹王泾闸流量/(m^3/s)	流量配比
编号	方案内容				
5	原始方案	15	7.5	7.5	1:1
5—1	流量比2:1方案	15	10	5	2:1
5—2	流量比3:2方案	15	9	6	3:2
5—3	流量比8:7方案	15	8	7	8:7

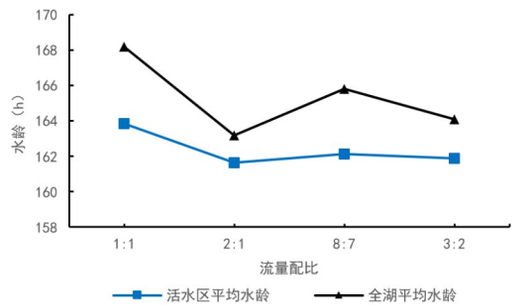


图5　南侧入湖、东侧及西侧共同出湖系列工况水龄对比图

Fig. 5　Comparison of water age under scenarios with inflow from the south side and combined outflow from east and west sides

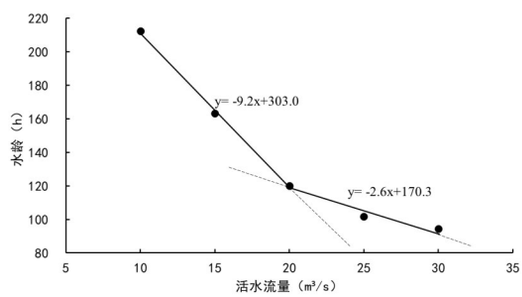


图6　活水流量与全湖平均水龄的关系

Fig. 6　Relationship between the regulated discharges and the average water age in the entire lake

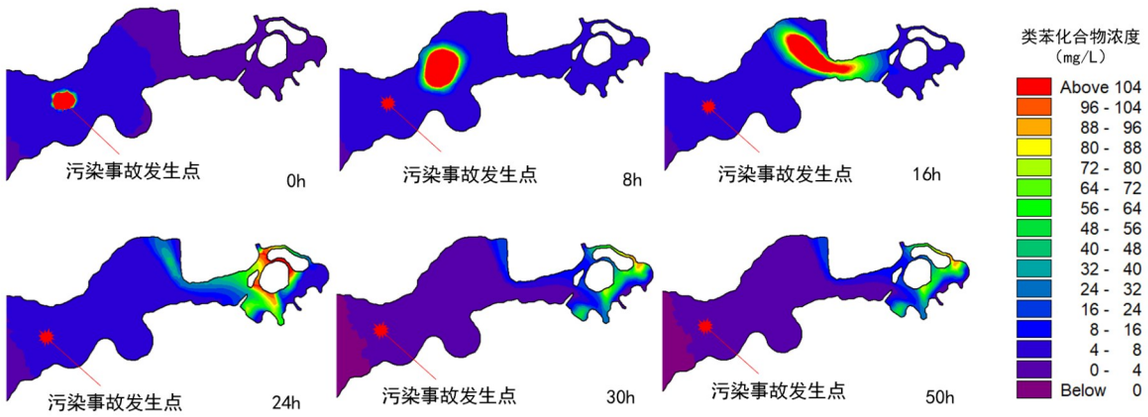


图7 突发污染类苯化合物输移云图

Fig. 7 Temporal variations of benzene compound under accidental pollution scenario

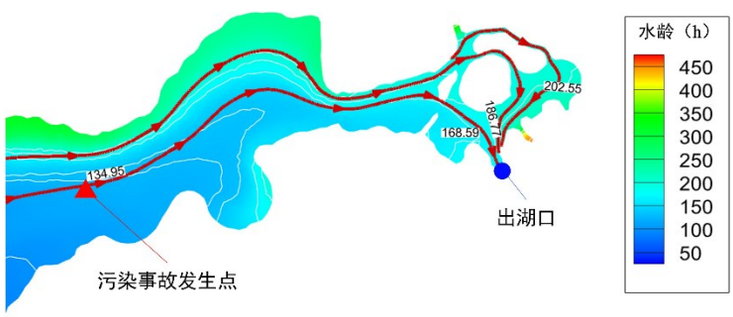


图8 基于水龄的水质演变快速预测分析

Fig. 8 Schematic diagram of the rapid prediction and analysis of water quality evolution based on water age



图9 基于水龄的水质演变快速预测流程图

Fig. 9 Flowchart of the rapid water quality evolution prediction procedure based on water age

[1] 陈瀚,方超,朱海,等.基于MIKE11的淮干中游突发水污染事故模拟研究[C]//第四届青年治淮论坛论文集:下册.南京:河海大学出版社,2022:1276-1281.
CHEN Han, FANG Chao, ZHU Hai, et al. Simulation Study on Emergent Water Pollution Accidents in the Middle Reaches of the Huai River Based on MIKE11[C]//Proceedings of the 4th Youth Forum on Huai River Management: Volume 2. Nanjing: Hohai University Press, 2022: 1276-1281.

[2] 黄轶康,李一平,邱利,等.基于EFDC模型的长江下游码头溢油风险预测[J].水资源保护,2015,31(1):91-98.
HUANG Yikang, LI Yiping, QIU Li, et al. Risk prediction on wharf oil spill in the lower reaches of Yangtze River based on EFDC[J]. WATER RESOURCES PROTECTION, 2015, 31(1):91-98.

[3] 石宝山,侯精明,王俊珲,等.基于GAST模型的突发水污染事故中污染物输移模拟[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(11):1112-1119.
SHI Baoshan, HOU Jingming, WANG Junhui, et al. Simulation of pollutant transport in sudden water pollution accident based on GAST model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(11):1112-1119.

[4] YAN B, LIU Y, GAO Z, et al. Simulation of Sudden Water Pollution Accidents in Hunhe River Basin Upstream of Dahuofang Reservoir[J]. Water, 2022, 14(6): 925.

[5] 徐月华.南水北调东线一期工程南四湖突发水污染仿真模拟及应急处置研究[D].济南:山东大学,2014.
XU Yuehua. Simulation and Emergency Disposal Re-

search on Sudden Water Pollution of Nansi Lake for the First-stage of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[6] DELEERSNIJDER E, CAMPIN J M, DELHEZ E J M. The concept of age in marine modelling : I. Theory and preliminary model results[J]. Journal of marine systems,2001,28(3):29-267.

[7] LI Y, ACHARYA K, YU Z. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China[J]. Ecological engineering, 2011, 37(2): 325-334.

[8] 戚文,李一平,王莹,等.基于EFDC模型的天镜湖水动力优化调控方案研究[J].水电能源科学,2015,33(1):47-51.
QI Wen, LI Yiping, WANG Ying, et al. Control and Optimization Scheme of Tianjing Lake Hydrodynamics Based on EFDC Model[J]. Water Resources and Power,2015,33(1):47-51.

[9] 李金华,李一平,唐春燕,等."引江济星"工程及风场环境影响广东肇庆星湖水龄分布特征[J].湖泊科学,2021, 33(2):449-461.
Li Jinhua, Li Yiping, Tang Chunyan, et al. Water age distribution characteristics of Lake Star (Zhaoqing, Guangdong) influenced by the Water Diversion Project and wind field[J]. J. Lake Sci,2021,33(2):449-461.

[10] 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[J].湖泊科学,2017,29(1):22-31.
HUANG Chunlin, LI Xi, SUN Yongyuan. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age[J]. J. Lake Sci,2017,29(1): 22-31.

[11] ZHANG X, ZOU R, WANG Y, et al. Is water age a reliable indicator for evaluating water quality effectiveness of water diversion projects in eutrophic lakes? [J].Journal of Hydrology, 2016,542: 281-291.

[12] GAI B, BOEHRER B, SUN J, et al. Vertical water age and water renewal in a large riverine reservoir[J]. Journal of Hydrology,2024,631:130701.

[13] 宋为威,鞠茂森.基于层次分析法-熵权法的河湖健康评估——以无锡滠湖为例[J].江苏水利, 2024(1):39-42.
SONG Weiwei, JU Maosen. Health Assessment Based on Analytic Hierarchy Process-Entropy Weight Method: A Case Study of Lihu Lake in Wuxi City[J]. JIANGSU WATER RESOURCES, 2024(1): 39-42.

[14] 刘元泉,光明,王福和.滠湖大桥施工技术[J].公路,2005(6):28-30.
LIU Yuanquan, GUANG Ming, WANG Fuhe. Construction Technology of Lihu Bridge[J]. HIGHWAY, 2005(6):28-30.

[15] 马芳冰.南水北调中线工程京石段危险货物运输事故风险分析与预警预报[D].北京:北京师范大学,2013.
MA Fangbing. Risk Analysis and Early Warning Forecast of Hazardous Materials Transportation Accidents for the Jingshi Section of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2013.

[16] 王兴伟,陈家军,郑海亮.南水北调中线京石段突发性水污染事故污染物运移扩散研究[J].水资源保护,2015, 31(6):103-108.
WANG Xingwei, CHEN Jiajun, ZHENG Hailiang, et al. Research on pollutant migration and diffusion in sudden water pollution accident in Beijing-Shijiazhuang Section of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. WATER RESOURCES PROTECTION,2015,31(6):103-108.

[17] 张成潇.河湖系统耦合算法与水沙特性研究—以淮河蚌埠以下段为例[D].南京:河海大学,2017.
ZHANG Chengxiao. Study on Coupled Algorithms and Characteristics of Hydrodynamic-Sediment Transport of the River-Lake System -- the Huaihe River Downstream from Bengbu as a Case Study[D]. Nanjing: Hohai University, 2017.

[18] ZHANG C, WANG L, ZHU H, et al. Integrated hydrodynamic model for simulation of river-lake-sluice interactions[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 83: 90-106.

[19] 王玲玲,朱海.工程紊流数值模拟方法及应用[M].北京:科学出版社, 2019:141-148.
WANG Lingling, ZHU Hai. Numerical Simulation Methods for Engineering Turbulent Flow and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2019: 141-148.