

水源与饮用水保障

陈思绪, 崔婧媛, 黄熠丽, 等. 基于水龄的陈行水库流场特征分析[J]. 净水技术, 2023, 42(3):60-66, 119.

CHEN S X, CUI J Y, HUANG Y L, et al. Analysis of flow field characteristics for Chenhang Reservoir based on the water age[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3):60-66, 119.

基于水龄的陈行水库流场特征分析

陈思绪, 崔婧媛, 黄熠丽, 张海平*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 水龄能够指示湖库内部各水域的水体更新效率, 是反映湖库流场特征的重要指标之一。文中以陈行水库为研究对象, 在构建库区二维水动力水质模型基础上, 应用拉格朗日颗粒追踪法, 分析不同情景下库区流速流向和水龄的空间分布特征, 并基于库区氯化物浓度分布特征初步探究了水龄与水质的关系。结果表明: 吞吐流决定了陈行水库库区的环流形状与方向, 当入库流量从 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 全库平均流速提升至 1.5 倍, 平均水龄从 1.20 d 缩短至 0.92 d, 表明水龄与入库流量之间不呈现简单的线性关系; 库区大部分区域对进水的响应时间明显缩短, 但西南沿岸区域的水龄始终超过 1.50 d。不同风向下, 库区环流规模以及水龄分布规律均呈现异质性。相对于静风情景, 东南风驱动下的环流规模向西北方向压缩, 库区西南侧局部区域出现新的滞水区, 全库平均水龄延长约 1 倍; 西北风则可显著降低库区西侧的水龄, 水龄高值区出现在库区东北侧。库区氯化物浓度与水龄分布趋势整体相反, 代表性点位的水龄与氯化物浓度呈现显著的负相关关系, 表明水龄可有效解释库区氯化物浓度的空间分布特征, 对氯化物等保守性物质在库区的迁移扩散过程具有较好表征作用。研究结果可深化对陈行水库流场特征的认识, 为水库的水质管理提供支撑, 同时也可为湖库流场研究提供新的思路。

关键词 水龄 颗粒追踪 MIKE 21 流场特征 陈行水库

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)03-0060-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.03.007

Analysis of Flow Field Characteristics for Chenhang Reservoir Based on the Water Age

CHEN Sixu, CUI Jingyuan, HUANG Yili, ZHANG Haiping*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Water age can indicate the water renewal efficiency of each water area, and it is one of significant indicator in the flow characteristics analysis in lakes and reservoirs. This paper established a 2D hydrodynamic and water quality model in Chenhang Reservoir to simulate the spatial distribution of flow direction and velocity under different scenarios, and the corresponding water age pattern was calculated with the Lagrangian particle-tracking method. The relationship between the water age and water quality was discussed based on the distribution characteristics of chloride concentration. The results showed that inlet/outlet flow determined the shape and direction of the circular flow in the reservoir. The increase in inlet/outlet discharge from $10 \text{ m}^3/\text{s}$ to $20 \text{ m}^3/\text{s}$ would increase the average current velocity by 1.5 times, and the average water age reduced from 1.20 days to 0.92 days, indicating that the relationship between water age and inlet/outlet discharge was not linear; although the response time of most areas was obviously shortened, the water age of the southwest lakeshore area still remained in over 1.50 days. Under different wind directions, the circulation scale and water age distribution of the reservoir were spatially heterogeneous. Compared with the calm wind condition, the circulation scale driven by the southeast wind shrank to the northwest, resulting in a new stagnant area in the southwest of the reservoir,

[收稿日期] 2022-10-28

[基金项目] 上海市科技重大专项(2021SHZDZX0100); 上海市科学技术委员会科研计划项目(19511132101)

[作者简介] 陈思绪(1998—), 女, 硕士, 研究方向为水环境模拟, E-mail: 2032879@tongji.edu.cn。

[通信作者] 张海平(1966—), 男, 博士, 研究方向为水环境模拟与富营养化机制, E-mail: hpzhang@tongji.edu.cn。

and the average water age of the whole reservoir doubled approximately. The northwest wind reduced the water age in the west of the reservoir significantly, and the area with higher water age appeared in the northeast of the reservoir. The distribution trend of the average chloride concentration and water age of the reservoir was generally the opposite. The water age showed a significant negative correlation with the chloride concentration at representative points, indicating that the water age could effectively explain the spatial distribution characteristics of chloride concentration, and was a useful indicator to characterize the advection and diffusion process of conservative substances. The study results may provide insights into the flow field characteristics and water quality management of Chenhang Reservoir, and inspire the study of flow field in other lakes and reservoirs.

Keywords water age particle tracking MIKE 21 flow field characteristics Chenhang Reservoir

流场承载着水域内物质的输移和扩散过程,是湖库水动力状况的直接表现形式^[1]。目前关于湖库流场特征的研究多借助数值模型方法,模拟不同水文、气象组合条件下流场的动态变化。如唐昌新等^[2]基于鄱阳湖二维水动力模型验证了长江倒灌的发生和持续时间,揭示了不同倒灌时期湖区水力梯度、湖流流向特点的不同。王辉^[3]通过大伙房水库三维水动力模型还原了风力作用下水库中层和底层的补偿流态,并表明风生流是影响大伙房水库流场的主要因素。刘翊竣等^[4]采用 MIKE 21 对洪泽湖流场的模拟结果表明,洪泽湖存在由风场主导的局部区域,而南区和东区的流场结构则由风生流和吞吐流共同驱动,且吞吐流占主导作用。上述研究多基于湖库环流形态、结构以及流速大小,描述区域水动力状况的时空演变过程,但常规的水动力相关指标与水质指标的关系不够明确,无法反映污染物的输移规律。因此,有研究^[5]引入水力停留时间、水龄等相关概念,以时间为单位量化湖库流场对水体物质输移的作用,架起水动力状况与污染物迁移、扩散过程之间的“桥梁”。较为常用的水力停留时间概念被定义为湖库水量与平均出入流量的比值^[6],可反映湖库的整体水体更新周期。由于实际中复杂流场结构与流量恒定、水体完全混合的假设有较大差距,这种基于单一比值的一般性描述容易产生偏差,且无法区分水体更新状况在空间位置上的不同^[7]。

水龄是指示踪剂或水团自离开其水龄定义为 0 的区域到达研究范围内指定位置所经过的时间^[5],通常将水体入口或上游边界处的水龄定义为 0,水龄越大说明该位置与外界的水体交换能力越弱。与水力停留时间相比,水龄对水体输移过程进行了拆分和细化,能够反映湖库内外水体交换效率的空间异质性。有越来越多的研究将水龄作为量化流场内

部物质输移时间尺度的重要指标,揭示水体水动力特性,识别交换效率较低的特征水域^[8],解释水质现象^[9],表征季节性变化或工程措施对大型湖泊水体输移效率的影响^[10-12]。但目前对湖库水龄与风场、吞吐流响应关系的研究尚缺少全面的流场数值试验,水龄对湖库内部水质浓度变化的指示作用也有待进一步挖掘。

本文以上海市陈行水库为例,基于 MIKE 21 搭建库区二维水动力水质模型,结合拉格朗日颗粒追踪法分析库区各水域的水龄特征,旨在探究吞吐流、风生流对库区流速流向和水龄空间分布的影响,并探讨水龄与氯化物浓度的关系,分析水龄对库区内污染物输移的指示作用。

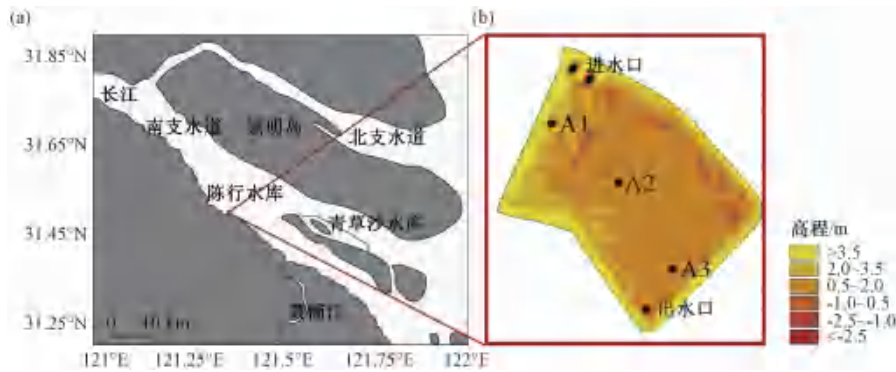
1 研究方法

1.1 研究区概况

陈行水库位于上海市宝山区罗泾镇,现有库容为 953 万 m^3 ,水域面积为 135 万 m^2 ,是上海“两江并举,多源互补”水源地格局中的重要一“源”。作为饮用水水源地,陈行水库具有“避咸蓄淡、避污蓄清”的功能,主要采用水力调节和生态治理的运行模式应对咸潮入侵及上游污潮。水库日常水位维持在 5~6 m,库区四周和西南部水深较浅,东南部水深较深,最大水深约为 8 m。通过两座江心式取水泵站从长江取水,由管道集中由库区北部进入水库,输水则通过库区东南角水下管道向水厂供水,平均供水量为 165 万 m^3/d ,最大供水能力达 228 万 m^3/d 。图 1 为陈行水库的地理位置及地形。

1.2 模型构建

由于陈行水库水深较浅,水体在垂直方向上的混合较为均匀,本文应用丹麦水力研究所(DHI)开发的二维水模拟软件 MIKE 21 来建立陈行水库二维水动力水质模型,该软件已在国内外不同类型的湖泊、水库、河道的水环境模拟上取得大量应用^[13]。



注: A1 为头部进水区, A2 为中央区, A3 为尾部出水区。

图 1 陈行水库(a)地理位置(b)地形与流场监测点位分布

Fig. 1 (a) Location, (b) Topography and Hydrological Monitoring Points in Chenhang Reservoir

陈行水库二维模型计算范围如图 2 所示(UTM30 投影坐标系,图 5~图 7 为相同投影坐标系),采用非结构网格进行模拟计算,在水平方向上共有 13 287 个节点,划分 26 042 个网格,网格单元边长最大约为 20 m。由于取水泵处进水流量的计算精度会影响整个库区流场,对库区头部网格进行局部加密,加密网格边长为 4.0~10.5 m。模型计算基于二维不可压 Navier-Stokes 方程,在满足流体静压假定和 Boussinesq 假定条件下,采用有限体积法进行求解。

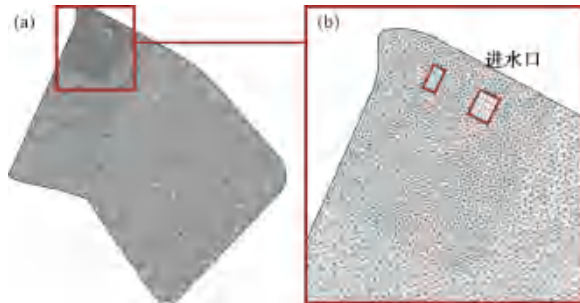


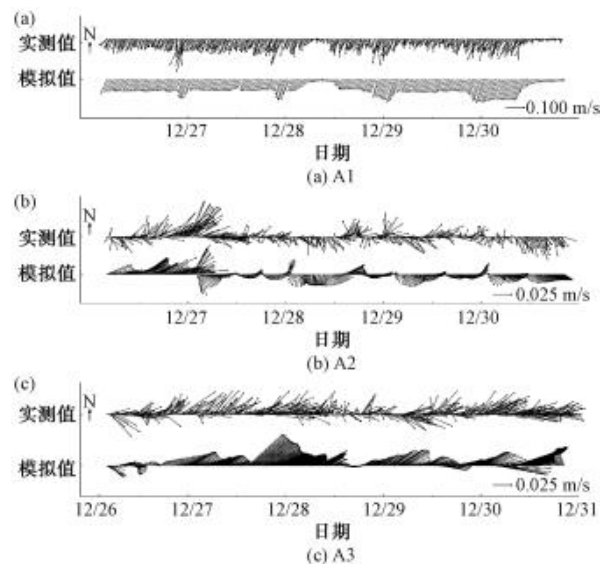
图 2 陈行水库(a)模型计算范围与网格
(b)库区头部加密网格示意图

Fig. 2 (a) Model Domain and Grid, (b) Dense Grid at the Raw Water Intake Head of the Reservoir

1.3 模型率定与验证

采用 2020 年陈行水库出水口实测水位资料以及 2021 年 5 月 7 日—5 月 14 日和 12 月 26 日—12 月 31 日的两次流场监测结果、实测风场和水库运行资料,对水动力模型进行率定和验证,其中实测流场数据采用走航式 ADCP 进行库区定点监测获取,取各测点垂线上的平均流速流向值。结果表明,2020 年水位模拟的平均相对误差为 0.70%。通过调节

风拖曳系数和曼宁系数,分别对 2021 年 5 月 7 日—5 月 14 日和 12 月 26 日—12 月 31 日两次流场监测结果进行率定和验证。流速流向验证时段的风场多为偏北风,图 3 为 A1、A2 和 A3 的流速和流向实测值和模拟值的比对,纳什效率系数(NSE)分别为 0.26~0.66 和 -0.38~0.73,均方根误差(RMSD)分别为 0.01~0.05 m/s 和 0.67°~29.51°(表 1),表明流场模拟结果与实测数据较为一致,所构建的模型能合理反映陈行水库的水动力特征。以 2021 年 3 月 1 日—3 月 15 日库外长江口氯化物实测数据作为边界条件,用水库出水口实测氯化物浓度对水质模型进行率定。结果表明,模拟结果与实测数据较



注:箭头长度表征流速大小;箭头所指方向表征水流方向。

图 3 陈行水库监测点位流速流向实测值与模拟值比对
Fig. 3 Comparison of Measured and Simulated Values of Velocity and Direction at Monitoring Points in Chenhang Reservoir

为吻合,平均相对误差为 8.49%,模型能够较好地反映库区的氯化物输移过程(图 4)。

表 1 陈行水库监测点位流速流向模拟误差统计
Tab. 1 Error Statistics of Velocity and Direction Simulation at Monitoring Points in Chenhang Reservoir

监测点位	流速		流向	
	NSE	RMSD/(m·s ⁻¹)	NSE	RMSD/°
A1	0.66	0.05	0.73	0.67
A2	0.61	0.01	0.17	11.54
A3	0.26	0.04	-0.38	29.51

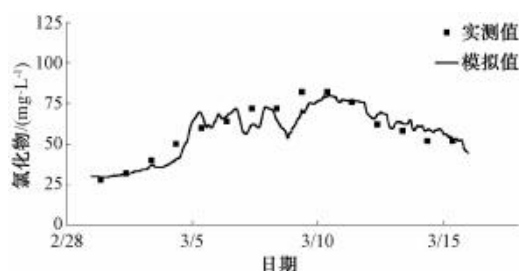


图 4 陈行水库出水口氯化物浓度率定结果
Fig. 4 Calibration Results of Chloride Concentration at the Outlet in Chenhang Reservoir

1.4 水龄计算

本文运用 MIKE 21 中的 ABM (agent based modelling) 模块,将水体视为流体颗粒的集合,基于拉格朗日颗粒追踪法,描述从指定位置释放的颗粒在库区内的输移轨迹,将单个颗粒首次到达指定网格的时间步长记为该网格的水龄。拉格朗日颗粒追踪法的主要原理是基于水动力模型的实时运算结果,跟踪记录研究范围内标识颗粒的漂移扩散轨迹^[7]。颗粒动力过程主要遵循 Langevin 方程,求解过程如式(1)。

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)\xi_t dt \quad (1)$$

其中:a——漂移项;

b——扩散项;

ξ ——随机数;

t——某一时刻;

X_t ——对应时刻空间位置。

采用递归法对欧拉坐标下的颗粒近似轨迹进行求解。本文以陈行水库进水口为起点,于模拟时段初始时刻投放一定数量的颗粒,在出水口所在网格处“拦截”颗粒,以模拟水库的进水和出水过程。在 30 d 的模拟时段内,随着颗粒初始投放数量的增

长,库内具有水龄计算值的网格比例先增长后逐渐稳定并趋近 100%。考虑对模型计算量的要求,当初始时刻颗粒投放数量为 1 000 个时,经过 30 d 的模拟,库区内没有颗粒经过的网格比例稳定在 1% 以内,认为此时能有效描述陈行水库的水龄分布状况。

1.5 情景设置与数值试验

崇明东滩气象站多年风场监测资料^[14]显示,该区域的春夏季盛行风为东南风、秋冬季盛行风为西北风,平均风速约为 5 m/s。陈行水库平均进出库流量约为 20 m³/s。围绕进出库流量和风场两个流场主要影响因素,本文设置以下情景方案开展数值试验。

(1) 静风条件下,对比进出水流量从 10 m³/s 增加至 20 m³/s 时水库流场的变化情况,探究流量对水库物质输运效率的影响。

(2) 平均流量条件下,以盛行风向和平均风速为风场条件,探究两种典型风场下水库流速流向及水龄的空间分布特征。

(3) 基于陈行水库实测氯化物浓度数据,探究库内水龄与氯化物浓度之间的关系。

2 结果分析与讨论

2.1 吞吐流对陈行水库流场的影响

流量是调节湖库水体交换速率的主要人为调控手段^[15]。图 5(a)、图 5(b)为静风状态下,入库流量分别为 10、20 m³/s 时的陈行水库流速流向分布状况。两种吞吐流作用下,库内流速流向的分布特征总体上较为一致。受到出流初始动量和水库地形的影响,库内大部分区域被强烈的逆时针环流所占据,环流西侧流速较大,库尾区域则在输水流量影响下形成小规模环流。流量增大导致全库流速有明显提升:静风状态下,当进水流量为 10 m³/s 时,全库平均流速约为 0.04 m/s,流速超过 0.10 m/s 的区域范围约占全库的 4.3%;流量增加为 20 m³/s 时,全库平均流速提升至 0.06 m/s,流速超过 0.10 m/s 的区域面积占比是原来的 2.5 倍,流速最大值达到 0.91 m/s。

水龄增长趋势与水流轨迹一致,如流量为 10 m³/s 作用下,水龄整体按逆时针方向沿两条环流路线增长[图 5(c)中红色虚线箭头所示]。同时,水龄直接表征了进水口水流到达全库任意位置的所需

时间。当入库流量增加 1 倍时,全库平均水力停留时间减半,而库区水龄平均值从 1.20 d 缩短至 0.92 d,表明水龄与流量之间不呈现简单的线性关系。另外,水龄对流量变化的敏感性存在空间上差异。流量增大时,库区头部逆时针环流所在区域对进水的

响应最为敏感,0.50 d 内完成“新水”流入的区域面积约是原来的 1.3 倍(表 2),库区东部水龄也明显缩短[图 5(c)、图 5(d)]。但水库西侧拐角及西南沿岸水域水龄(>1.50 d)仍相对较长,对流量增大未有明显响应。

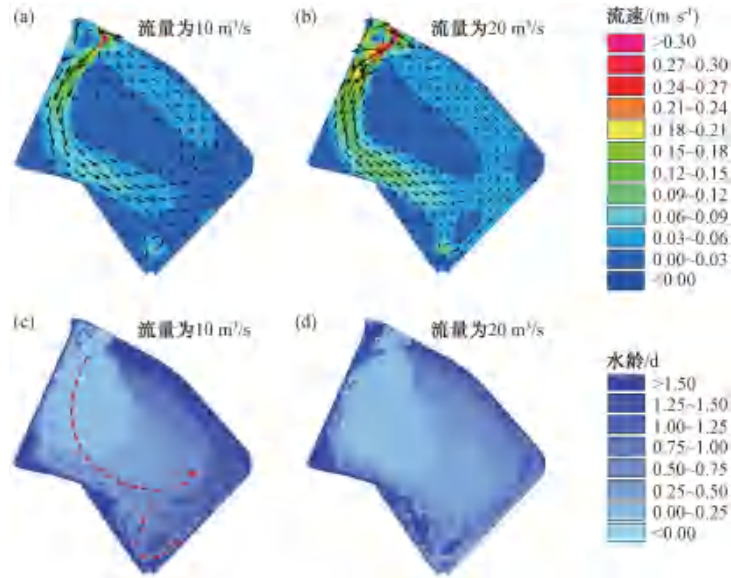


图 5 不同进水流量时水库流速流向和水龄分布

Fig. 5 Velocity Direction and Water Age Distribution of the Reservoir under Different Inflow

2.2 风场对陈行水库流场的影响

以静风、 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 进出水流量作为基准情景 [图 5(b)、图 5(d)],对比风速为 5 m/s 下东南风、

西北风的水库流速流向分布(图 6),发现风生流加入前后的库内流速水平、流场形态基本一致,而库区头部的环流作用范围呈现明显差异,表明吞吐流决

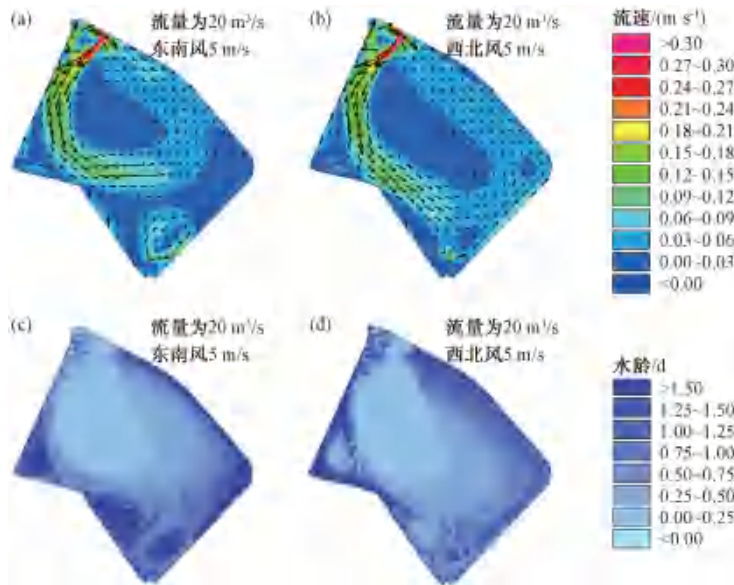


图 6 吞吐流叠加东南风、西北风作用下水库流速流向和水龄分布

Fig. 6 Velocity Direction and Water Age Distribution under Southeast and Northwest Winds Combined with Inflow-Outlet

定了库区环流形状和方向,而风场则主要使环流规模发生改变。东南风导致逆时针环流范围向西北方向缩小,体现了东南风对库区头部环流规模的制约作用,而库尾区域的小规模环流面积则在风生流和吞吐流的共同作用下向西北方向扩大。相反地,西北风作用下的库内环流范围向东南方向扩张,库尾小尺度环流面积大幅缩小。

水龄分布进一步揭示了东南风与西北风对陈行水库流场影响的差异性。东南风作用下,水龄值大于 1.00 d 的区域面积占全库的 1/4,约是基准情景的 1.6 倍,库区平均水龄达 1.89 d。相对于静风条件,东南风导致陈行水库平均水龄延长约 1 倍,仅有东北水域的水龄小幅缩短。水龄高

的区域范围向库区中央方向延伸,尤其两个逆时针环流与水库边界构成的三角形区域内水龄值可达 7.00 d 以上,成为上游进水的新的“死角”。西北风作用下的水龄空间分布特征则有很大不同。相比于静风条件,库区水龄增大和减小的面积近似相等,库区平均水龄为 1.06 d,与静风状态下平均水龄的差距较小。西北风驱动下,库区头部环流辐射范围扩展,基准情景中的水龄高值区域(西侧拐角及西南沿岸)与进水的交换效率大幅提升,水库西侧拐角局部区域的水龄减小幅度可达 1.00 d,进一步表明西北风对水库西部水域的流动性有明显改善作用。相应地,库区东北侧及西北侧边缘水域的水龄整体延长 6~12 h。

表 2 不同流量和风场作用下的库区水龄与对应面积

Tab. 1 Water Age and Corresponding Area under Different Flow and Wind Fields

风场	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	平均水龄/d	不同水龄区间对应的面积占比			
			0~0.50 d	0.50~1.00 d	1.00~1.50 d	1.50 d 以上
静风	10	1.20	44.86%	27.75%	12.60%	14.79%
静风	20	0.92	57.38%	26.68%	7.01%	8.93%
东南风,5 m/s	20	1.89	49.49%	24.85%	12.04%	13.62%
西北风,5 m/s	20	1.06	53.81%	22.11%	13.80%	10.27%

2.3 水龄与氯化物浓度的关系

2021 年 3 月 1 日开始,在库外长江氯化物浓度升高的影响下,陈行水库取水口氯化物浓度在 3 月 10 日达到峰值,而后逐渐回落。本文基于 2021 年 3 月 1 日—3 月 15 日水库实测资料,模拟了该时段库区的氯化物浓度和水龄分布,以探究水龄与氯化物浓度之间的关系。

该时段实测风场以西北风为主,平均风速为 3.2 m/s,平均进出库流量为 16.9 m³/s,库区平均水龄模拟结果如图 7(a)所示。图 7 中 B1~B10 是均匀分布在库区的代表性点位,用于提取模拟结果,分析水龄与氯化物浓度之间的关系。B6 位于逆时针环流中心;位于库区西南沿岸、尾部环流中心和东侧拐角区域的水龄值较高,分别对应 B3、B4、B8 点位。该时段内库区平均氯化物浓度如图 7(b)所示,浓度分布整体与水龄呈现相反的趋势。10 个点位的平均水龄与氯化物浓度的皮尔逊相关系数为 -0.88 (p<0.01),存在显著的负相关关系(图 8)。水体交换是水质变化的主要驱动力之一,库区水龄较低的区域易受到进水水质影响,库区西北侧和库区中央(B1、B2、B6)周边区域的水龄较低,平均氯化物浓

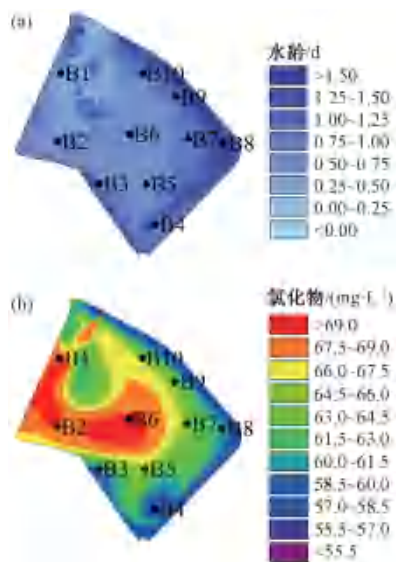


图 7 陈行水库 (a) 平均水龄 (b) 氯化物浓度分布

Fig. 7 (a) Average Water Ages, (b) Chloride Concentration Distribution in Chenhang Reservoir

度较高;水龄高值区(B3、B4、B8)与氯化物浓度低值区基本一致。水龄可有效解释库区氯化物浓度的空间分布特征,显示其对氯化物等保守性物质在库区的迁移扩散过程具有较好表征作用。由于非保守

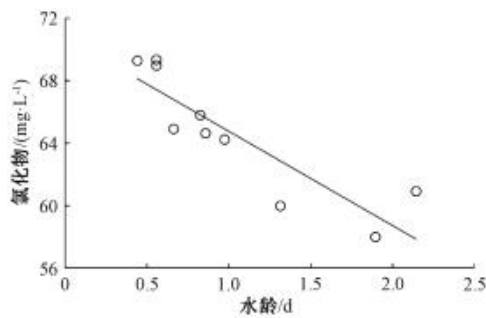


图8 陈行水库 B1~B10 点位平均水龄与氯化物浓度值关系
Fig. 8 Correlation of Average Water Ages and Chloride Concentration Values at Points B1~B10 in Chenhang Reservoir

性物质存在生物化学反应过程,其在水体中的浓度变化规律更为复杂,且与水龄之间的关系有待更进一步的研究。

3 结论

本文在陈行水库二维水动力水质模型基础上,结合拉格朗日颗粒追踪法,模拟了不同湖流情景下的陈行水库流场特征,分析了库区水龄与氯化物浓度之间的关系,主要结论如下。

(1) 吞吐流决定了陈行水库库区的环流形状与方向。静风条件下,当进出库流量从 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,全库平均流速提升至 1.5 倍,进水口附近的环流范围及强度增大,库尾小尺度环流消失;平均水龄从 1.20 d 缩短至 0.92 d,表明水龄与进出库流量之间不呈现简单的线性关系;库内大部分区域对进水的响应时间明显缩短,但西南沿岸区域水龄始终超过 1.50 d。

(2) 不同风向下,陈行水库库区环流尺度以及水龄分布规律均呈现显著差异性。东南风作用下,进水口附近环流范围向西北方向缩小,库尾环流范围随之扩大,头部、尾部两个逆时针环流之间的夹角区域成为新的滞水区,全库平均水龄相对于静风情景延长约 1 倍;与之相反,西北风推动了环流辐射范围的扩大,水库西侧水体水龄明显缩短,减小幅度可达 1.00 d,水龄高值区从水库西南沿岸转变为东北侧区域。

(3) 库区平均水龄与氯化物浓度存在显著的负相关关系,两者的皮尔逊相关系数为 -0.88 ($p < 0.01$),水龄高值区与氯化物浓度低值区基本一致。水龄可有效解释库区氯化物浓度的空间分布特征,显示其对氯化物等保守性物质在库区的迁移扩散过

程具有较好的表征作用。

参考文献

- [1] 李恒鹏,陈伟民,杨桂山,等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 785-798.
LI H P, CHEN W M, YANG G S, et al. Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: A case study of Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir area[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(6): 785-798.
- [2] 唐昌新,熊雄,邹年华,等. 长江倒灌对鄱阳湖水动力特征影响的数值模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 700-710.
TANG C X, XIONG X, WU N H, et al. Simulation of the impact of the reverse flow from Yangtze River on the hydrodynamic process of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 700-710.
- [3] 王辉. 大伙房水库流场影响因素的数值模拟研究[J]. 中国水运, 2015, 15(6): 76-77.
WANG H. Numerical simulation study on influencing factors of flow field in Dahuofang Reservoir[J]. China Water Transport, 2015, 15(6): 76-77.
- [4] 刘翊竣,徐国宾. 风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 174-178.
LIU Y J, XU G B. Effects of wind field and throughput flow on the flow field of Hongze Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(2): 174-178.
- [5] BOLIN B, RODHE H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs[J]. Tellus, 1973, 25(1): 58-62.
- [6] NAUMAN E B. Residence time theory[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(10): 3752-3766.
- [7] 李云良,姚静,李梦凡,等. 鄱阳湖换水周期与示踪剂传输时间特征的数值模拟[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 32-42.
LI Y L, YAO J, LI M F, et al. Numerical simulations of residence time and tracer travel time in Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 32-42.
- [8] DELHEZ E J M, CAMPIN J M, HIRST A C, et al. Toward a general theory of the age in ocean modelling[J]. Ocean Modelling, 1999, 1(1): 17-27.
- [9] WANG Y, SHEN J, HE Q. A numerical model study of the transport timescale and change of estuarine circulation due to waterway constructions in the Changjiang Estuary, China[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 82(3): 154-170.
- [10] 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.

(下转第 119 页)

- 理, 2012, 32(7): 18-20.
- ZHAO D, DONG Y M. Technical progress in the treatment of casing wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(7): 18-20.
- [2] 栗栗, 张铁坚, 刘俊良. 厌氧+氧化沟工艺处理肠衣废水的实验研究[J]. *水处理技术*, 2021, 47(12): 91-94, 98.
- LI S, ZHANG T J, LIU J L. Experimental study on the casing wastewater treatment by anaerobic + oxidation ditch process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(12): 91-94, 98.
- [3] 王蓓蓓, 孙佳伟, 周宁娟, 等. 高级催化氧化预处理高浓度有机制药废水的试验[J]. *净水技术*, 2021, 40(8): 132-136.
- WANG B B, SUN J W, ZHOU N J, et al. Experiment of advanced catalytic oxidation process for high concentrated organic pharmaceutical wastewater treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(8): 132-136.
- [4] 段西兵. 合成类高浓高盐制药废水预处理工艺的应用[J]. *净水技术*, 2021, 40(s1): 386-389.
- DUAN X B. Application of pretreatment process for synthetic high-concentration and high-salt pharmaceutical wastewater [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(s1): 386-389.
- [5] 邹蓓蓓, 陈义. 高浓度有机废水处理技术的研究进展[J]. *化工管理*, 2021(9): 40-41.
- ZOU B B, CHEN Y. Research progress of high concentration organic wastewater treatment technology [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021(9): 40-41.
- [6] 吕宝一, 谢冰, 邵春利, 等. 两段 A/O 生物接触氧化法处理高盐有机废水研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(1): 102-104, 108.
- LÜ B Y, XIE B, SHAO C L, et al. Treatment of saline organic wastewater by two-stage A/O biological contact oxidation process [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(1): 102-104, 108.
- [7] 高廷东, 卢继承, 林贞贤. 水解酸化/CASS 工艺处理肠衣废水[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(4): 65-66, 70.
- GAO T D, LU J C, LIN Z X. Hydrolysis acidification/CASS process for treatment of casing wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(4): 65-66, 70.
- [8] 潘锋, 浦定艳, 王连军. 肠衣废水的厌氧生物处理[J]. *中国沼气*, 2006(4): 9-12.
- PAN F, PU D Y, WANG L J. Treating casing wastewater by EGSB reactor [J]. *China Biogas*, 2006(4): 9-12.
- [9] 徐爱荣, 周晓惠. 高盐度、高 COD 肠衣废水的治理研究[J]. *环境与发展*, 2019, 31(12): 32-32, 34.
- XU A R, ZHOU X H. Study on treatment of high salinity and high COD casing wastewater [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(12): 32-32, 34.
- [10] 高超龙, 隋倩雯, 陈彦霖, 等. 进水浓度对厌氧氨氧化脱氮与微生物特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(4): 26-34.
- GAO C L, SUI Q W, CHEN Y L, et al. Effects of influent concentration on nitrogen removal and the microbial characteristics of anammox process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(4): 26-34.

(上接第 66 页)

- LI J H, LI Y P, TANG C Y, et al. Water age distribution characteristics of Lake Star (Zhaoqing, Guangdong) influenced by the Water Diversion Project and wind field [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2): 449-461.
- [11] 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 C L, LI X, SUN Y Y. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1): 22-31.
- [12] 杨金艳, 徐勇, 周杰, 等. 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选[J]. *水利水运工程学报*, 2020(2): 85-90.
- YANG J Y, XU Y, ZHOU J, et al. Optimization of reservoir cycling water scheme based on water age to reduce algal bloom risk [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 85-90.
- [13] 穆聪, 李家科, 邓朝显, 等. MIKE 模型在城市及流域水文——环境模拟中的应用进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 71-80.
- MU C, LI J K, DENG Z X, et al. Application of MIKE model in urban and basin hydrological-environmental simulation [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(2): 71-80.
- [14] 戴苒, 朱建荣. 长江口崇明东滩风况统计分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015(4): 17-25.
- DAI R, ZHU J R. Statistical analysis of the wind at the Chongming eastern beach [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2015(4): 17-25.
- [15] 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[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(6): 165-171.
- JIANG H Z, CUI L, SHI F, et al. Study on influences of wind field, topography and inflow/outflow on flow in Lake Tai [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(6): 165-171.