

文章编号:1673-9469(2025)06-0083-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.010

风场对岗南水库水体滞留时间及污染物扩散的影响研究

张昭¹,张少雄^{2*},张力霆²

(1.河北省农村供水总站,河北石家庄 050011;2.石家庄铁道大学 土木工程学院,河北石家庄 050043)

摘要:为探究风场对岗南水库滞留时间的影响,建立了岗南水库水动力和水体交换模型,设置5种不同风向工况模拟了水体滞留时间,建立了各分区的连通性矩阵,结果表明:风场作用使整个库区水体流速增大,在东风、西风和北风条件下,库区内形成了2个大小、方向不同的环流,且1个环流主要在II、III、IV和VII区,1个环流主要在IV、X库区;南风条件下,库区内主要在II、III、IV区形成了4个大小、方向不同的环流;有风条件下库区的整体滞留时间略高于无风条件,但两者相差不大。风场对主库区和库湾区滞留时间影响不同,风场作用下主库区的滞留时间略有增加,但库湾区滞留时间明显缩短;风场对主库区I—IV污染物扩散的影响不大,对库湾区污染物扩散影响较大,加速了库湾区污染物扩散。在有风的条件下引水不仅可以增大流速,还可以增加各库区(尤其是库湾区)水体之间的连通性,提高水体交换能力,有助于改善水质。

关键词:岗南水库;风场;水体交换;滞留时间;连通性;数值模拟

中图分类号:X254

文献标识码:A

Influence of Wind Field on Water Residence Time and Pollutant Diffusion in Gangnan Reservoir

ZHANG Zhao¹, ZHANG Shaoxiong^{2*}, ZHANG Liting²

(1. Hebei Province Rural Water Supply Terminal, Shijiazhuang, Hebei 050011, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: In order to explore the influence of wind field on the residence time of Gangnan Reservoir, a hydrodynamic and water exchange model of Gangnan Reservoir was established. Set five working conditions of different wind direction, established connectivity matrices for each partition. The results show that the wind field increases the water flow velocity in the whole reservoir area. Under the condition of east, west and north wind, two circulations with different sizes and directions are formed in the reservoir area, and one circulation is mainly in areas II, III, IV and VII, and the other one circulation is mainly in areas IV and X. Under the condition of south wind, four circulations with different sizes and directions are formed in areas II, III and IV. The overall residence time of the reservoir area under windy conditions is larger than that under windless conditions, but the overall residence time is not much different. Furthermore, The influence of wind field on the residence time of main reservoir area and bay area is different. The residence time of main reservoir area increases slightly under the action of wind field, but the residence time of bay area is significantly shortened. The wind field has little effect on the diffusion of I to IV pollutants in the main reservoir area. Wind field has great influence on the diffusion of pollutants in the bay area, which accelerates the diffusion of pollutants in the bay area. The results show that the water diversion under the condition of wind can not only increase the flow velocity, but also increase the connectivity between the water bodies in the reservoir area, especially in the bay area,

收稿日期:2024-07-28

基金项目:河北省重点研发计划项目(20375409D)

第一作者:张昭(1982—),男,河北定兴人,硕士,高级工程师,从事水利工程管理、水环境方面的研究。

* 通信作者:张少雄(1984—)男,河北定州人,博士,教授,从事水环境生态保护与修复方面的研究。

improve the water exchange capacity and help to improve the water quality.

Key words: Gangnan Reservoir; wind field; water exchange; residence time; connectivity; numerical simulation

水库蓄水后可能导致水体自净能力差^[1-2],并出现部分水体滞留的现象,进而引发水质问题。滞留时间作为表征水体交换能力的一个重要时间尺度^[3],已成为水库、水环境研究的热点^[4]。

近年来,国内外学者对水体滞留时间的研究较为广泛。Xiong等^[5]研究了切萨皮克湾内不同区域水体交换与滞留时间的关系,发现水体交换与平均滞留时间可以通过体积建立联系,在使用平均滞留时间计算流量时应考虑时间滞后效应;石泳昊等^[6]对影响湛江湾水体滞留时间的因素进行了全面和深入的研究,研究表明,湛江湾的洪枯季、大小潮、风暴潮和东海大堤等均对滞留时间产生影响;蒋文治等^[7]运用欧拉法计算了海平面抬升不同高度时,珠江河口水体滞留时间的变化情况,发现珠江不同水域的平均滞留时间随海平面抬升而增加;Gao等^[8]对某人工湖12个子区域的滞留时间进行了研究,发现经过工程抽排水和人工调度后,湖区的滞留时间有明显缩短,水体交换能力提高;Yao等^[9]基于MIKE 21软件建立了二维水动力模型,研究了不同风速下鄱阳湖的滞留时间,结果表明,风速较小的北北东风对湖区的混合和扩散十分不利,容易使东部湖湾区物质富集;叶群^[10]将鄱阳湖水域分为6个区域,研究了各分区有无枢纽情况下秋、冬季的滞留时间变化情况,发现不同分区秋、冬季滞留时间变化各有不同。吴昊昊等^[11]基于MIKE 21软件建立了沱湖流域的二维水动力模型,对比了有风、无风条件下沱湖水体更新时间均值的空间变化,结果表明,风是决定沱湖流场形态的重要因素,且沱湖水体更新能力具有空间异质性,西部湖区水体更新速度快、东部湖区水体更新速度慢。总的来说,现有研究对海湾、河口和湖泊的滞留时间变化规律研究较多,对水库的滞留时间及污染物扩散规律研究较少。

岗南水库是河北省四大水库之一,总库容为15.71亿m³,是石家庄市的主要饮用水源地之一。研究岗南水库的水体滞留时间、探究水库的污染物扩散规律,可为后续提升水体净化能力、改善水库水生态环境^[12-13]提供理论依据。本文对不同风场下岗南水库的滞留时间进行研究,得到了岗南水库各库区水体交换情况以及污染物扩散规律,

研究成果可为制定岗南水库引水方案提供科学参考。

1 研究方法

为了更准确地研究岗南水库各部分水体的交换情况,将岗南水库划分为10个分区。其中,I—IV库区为主库区,V—X库区为库湾区,具体划分如图1所示。

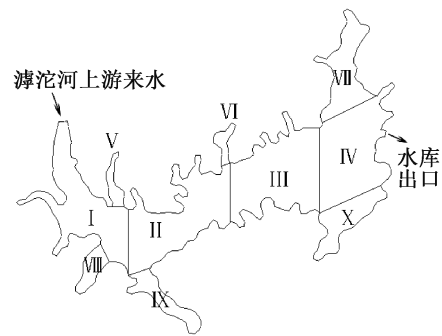


图1 岗南水库研究区域及主要分区

Fig. 1 Gangnan Reservoir study area and major subdivisions

1.1 水体滞留时间

水动力模型采用垂向平均二维模型,该模型基于三向不可压缩的Navier-Stokes方程建立^[14-16],并服从于Boussinesq假定和静水压力的假定^[17-21],二维非恒定浅水方程组见式(1)一式(3)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{h}u}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}uv}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{h}v}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}vu}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v^2}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t 为时间,s; h 为计算点处的瞬时水深,m; η 为水位,m; \bar{u} 、 \bar{v} 为 x 、 y 方向的速度分量,m/s; ρ 为

水库中水的密度, kg/m^3 ; ρ_0 为标准状态下水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; P_a 为当地大气压, Pa ; f 为科里奥利参数, $f = 2\omega \sin\varphi$, ω 为地球自转角速率, rad/s , φ 为地理纬度, $(^\circ)$; s_{xx} , s_{xy} , s_{yy} 为辐射应力分量, Pa ; T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} , T_{yy} 为水平粘滞应力, Pa ; S 为源汇项; u_s , v_s 为源汇项水流流速, m/s ; τ_{sx} , τ_{sy} 为表面风应力, Pa ; τ_{bx} , τ_{by} 为底摩擦应力, Pa 。

滞留时间是指以溶解态保守型物质为示踪剂,通过质点追踪的方法标识出研究区域内各质点第一次到研究区域外的时间^[5]。当计算分区的滞留时间时,指定该分区的示踪物浓度为 1(任意单位),其余分区的浓度为 0(任意单位),具体初始条件见式(4),子分区的滞留时间 R_i 见式(5)。

$$C_i(t_0, x \in \Omega_i) = 1; C_i(t_0, x \in \Omega/\Omega_i) = 0 (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

$$R_i = \frac{\int_0^\infty \int_{\Omega} H(t, x) C_i(t, x) dx dt}{\int_{\Omega} H(t_0, x) C_i(t_0, x) dx} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中, t_0 为初始时刻, s ; $C_i(t, x)$ 为示踪物浓度, mg/L ; Ω_i 为研究区内第 i 个分区的水域范围, 当 $i = 0$ 时, Ω_0 表示整个研究区域作为一个整体; H 为研究区域各处的水深, m 。

1.2 模型建立

本文建立岗南水库水动力模型,共得到 2 405 个非结构网格,模型网格划分情况如图 2 所示。模型的底床摩擦采用曼宁公式,曼宁系数为 $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, 涡粘系数采用 Smagorinsky 公式,Smagorinsky 系数为 $0.28 \text{ m}^2/\text{s}$ 。为了研究风场对岗南水库滞留时间的影响,本文针对不同方向风场开展数值模拟,模拟时长为 365 d,具体工况见表 1。

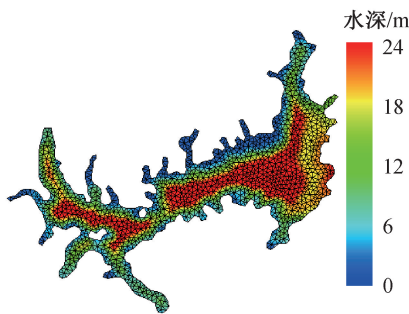


图 2 岗南水库研究区域网格划分及水深图
Fig. 2 Grid delineation and bathymetric map of the Gangnan Reservoir study area

表 1 研究工况

Tab. 1 Study working conditions

工况	风场	入库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	出库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	北风	20	-20
2	南风	20	-20
3	东风	20	-20
4	西风	20	-20
5	无风	20	-20

1.3 模型验证

使用岗南水库 2012 年实测数据对模型进行验证,水位验证结果如图 3 所示。由图 3 可知,模型水位曲线拟合良好。本文采用均方根误差和相关系数分析^[17,20]对实测水位、模拟水位作误差及相关性分析。均方根误差 RMSE 计算见式(6),相关系数 r 计算过程见式(7)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}} - X_{\text{mod}})^2 / N} \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{mod}} - \bar{X}_{\text{mod}})(X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{mod}} - \bar{X}_{\text{mod}})^2 \sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}})^2}} \quad (7)$$

式中, X_{obs} 为实测水位, m ; X_{mod} 为模拟水位, m ; \bar{X}_{obs} 为实测水位平均值, m ; \bar{X}_{mod} 为模拟水位平均值, m ; i 为时间序列, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

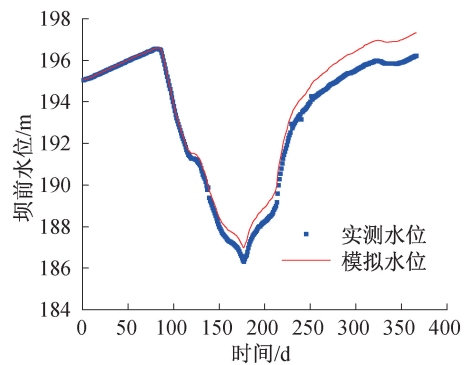


图 3 水位验证图

Fig. 3 Verification of water level

根据均方根误差和相关系数分析,均方根误差越接近 0、相关系数越接近 1,说明模拟水位与实测水位越接近,模拟效果越好。经计算,实测水位和模拟水位均方根误差为 0.644 m ,相关系数为 0.993 ,说明模拟水位与实测水位拟合良好,水动力模型具有较高的精度,为后续水体交换研究奠定了基础。

2 结果分析

2.1 风场对岗南水库流场的影响

岗南水库各工况下的流场如图4所示。由图4可以看出,在无风条件下,岗南水库入口处流速较大,流速最大为 1.25 cm/s ,Ⅶ库区有1个较小的逆时针环流,Ⅹ库区有1个顺时针环流。由北风作用下的岗南水库流场可知,流速最大为 3.57 cm/s ,库区有1个大的逆时针环流和1个小的顺时针环流,逆时针环流位于Ⅲ、Ⅳ、Ⅶ库区,顺时针环流位于Ⅳ、Ⅹ库区;由南风作用下的岗南水库流场可知,流速最大为 3.56 cm/s ,库区有2个逆时针环流和2个顺时针环流,4个环流由西向东依次排列于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ库区;由东风作用下的岗南水库流场可知,流速最大为 4.28 cm/s ,库区有1个逆时针环流和1个顺时针环流,逆时针环流位于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅶ库区,顺时针环流位于Ⅳ和Ⅹ库区;由西风作用下的岗南水库流场可知,流速最大为 4.28 cm/s ,库区有1个逆时针环流和1个顺时针环流,逆时针环流位于Ⅲ、Ⅳ和Ⅹ库区,顺时针环流在靠近出口处,位于Ⅲ、Ⅳ库区。各方向风场作用下岗南水库整体的流速都增大,并且风向不同,库区内形成的环流的大小和位置也不同。根据以上分析可知,在有风的条件下引水能增加流速,进而加快各库区水体之间的交换速度。

2.2 风场对岗南水库滞留时间的影响

2.2.1 整体滞留时间

岗南水库库区的整体滞留时间是指从初始条件下示踪物布满整个库区至被排出整个库区所经历的时间。北风、南风、东风、西风和无风工况下岗南水库整体滞留时间分别为 210.22 、 207.57 、 281.52 、 210.67 和 206.26 d 。岗南水库在无风条件下整体滞留时间最短,在东风条件下的整体滞留时间最长。

2.2.2 各分区滞留时间

不同风场下各分区的滞留时间如图5所示,主库区Ⅰ—Ⅳ由西向东滞留时间逐渐减小,其中Ⅰ库区距离出口最远,滞留时间最长,Ⅳ库区距离出口最近,滞留时间最短;库湾区中Ⅵ、Ⅸ库区滞留时间较长,Ⅶ、Ⅹ库区的滞留时间较短。

当地滞留时间^[3]是指在某子库区的水质点在被排出整个库区之前在其自身子库区所经历的时间。某库区当地滞留时间占该库区滞留时间比例越大,说明该库区与外界水体交换能力越差。由图5可知,Ⅵ库区当地滞留时间占该库区滞留时间的比例分别为 84.68% 、 85.85% 、 84.94% 、 87.03% 和 89.95% ;除库湾区Ⅵ以外,其他各库区当地滞留时间的占比较小。因此,Ⅵ库区的水体交换能力最差。无风条件下,Ⅶ—Ⅹ库区当地滞留时间占比较大,说明无风条件下库湾区Ⅶ—Ⅹ的水体交换能力较差。

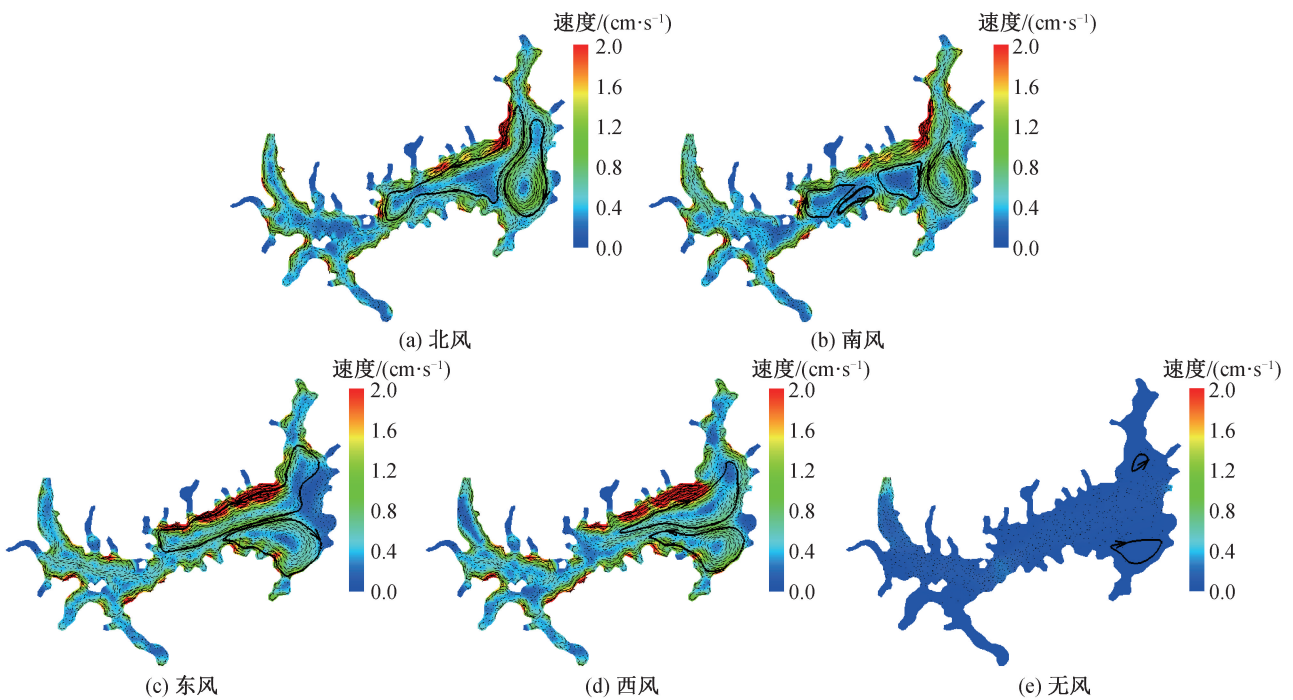


图4 各工况下流场分布图

Fig. 4 Flow field distributions at each working condition

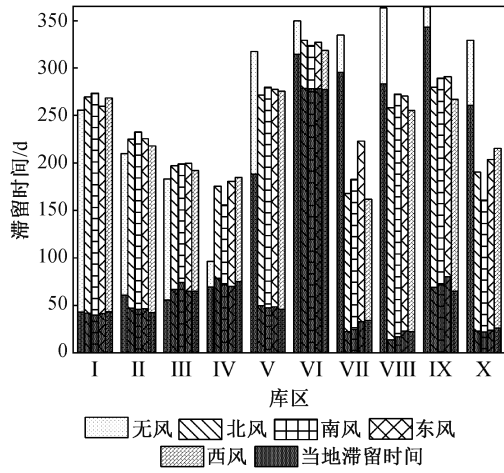


图 5 不同工况下各分区滞留时间

Fig. 5 Retention time of each partition under different working conditions

总而言之,在有风条件下进行引水增加了主库区的滞留时间,同时大幅度缩短了库湾区的滞留时间,有助于改善水质。

2.3 风场对岗南水库污染物扩散的影响

为了研究风场对岗南水库的污染物扩散规律的影响,本文引入连通性的概念^[3],将各分区的滞留时间构建成一个连通性矩阵。当水库中的某一分区受到污染时,可通过连通性矩阵分析受污染分区对其他分区的影响,最后可以得到各分区之间的联系。

各风场下岗南水库的连通性矩阵图如图 6 所示,该水库各个分区之间存在显著的连通性,不同的源分区水质点在流动过程中对其他分区的影响

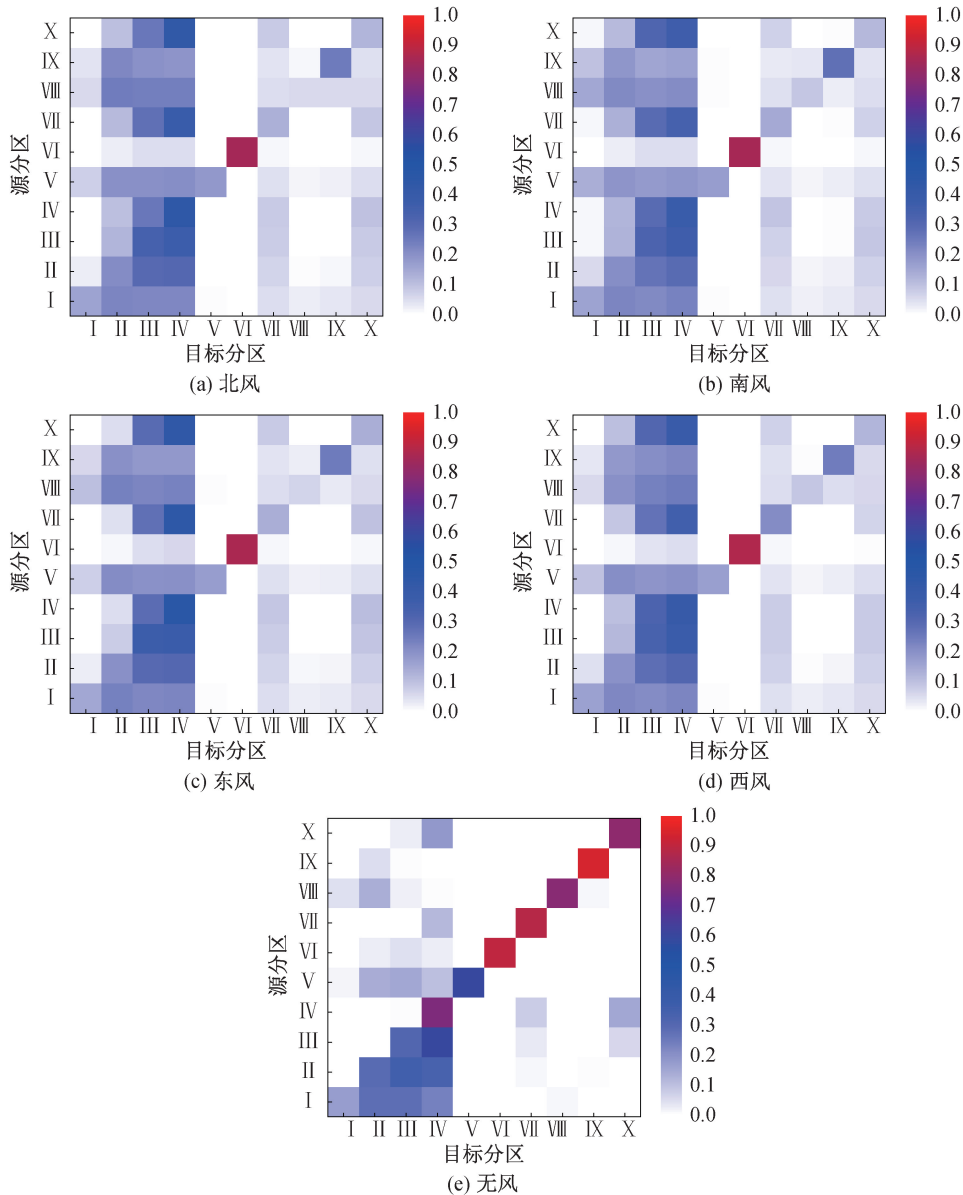


图 6 不同工况下连通性矩阵

Fig. 6 Connectivity matrix under different operating conditions

不同。位于矩阵对角线上的方格表示该库区的当地滞留时间,矩阵中的颜色深浅表示该分区的滞留时间占总滞留时间的比例,颜色越深,比例越大。北风、南风、东风和西风条件下连通性矩阵如图 6(a)~(d)所示,可以看出,各风场作用下污染物的扩散规律大体相同,连通性矩阵大体一致。当 I 库区被污染时,II、III 和 IV 库区受到显著影响;当 II 库区被污染时,III 和 IV 库区受到显著影响;当 III 库区被污染时,IV 库区受到显著影响;当 IV 库区被污染时,III、VII 和 X 库区受轻微影响;当 V 库区被污染时,II、III 和 IV 库区受到轻微影响;当 VI 库区被污染时,其他库区不会受到影响;当 VII 库区被污染时,III 和 IV 库区受轻微影响;当 VIII 库区被污染时,I、II、III 和 IV 库区受显著影响;当 IX 库区被污染时,I、II、III 和 IV 库区受轻微影响;当 X 库区被污染时,III、IV 库区受到较显著影响。无风条件下的连通性矩阵如图 6(e)所示,当 I 库区被污染时,II、III 和 IV 库区受到显著影响;当 II 库区被污染时,III 和 IV 库区受到显著影响;当 III 库区被污染时,IV 库区受影响较为显著,X 库区受到轻微影响;当 IV 库区被污染时,VII、X 库区受轻微影响;当 V 库区被污染时,II、III 和 IV 库区受到轻微影响;当 VI 库区被污染时,其他库区不会受到影响;当 VII 库区被污染时,IV 库区受轻微影响;当 VIII 库区被污染时,II 库区受轻微影响;当 IX 库区被污染时,其他库区不会受到影响;当 X 库区被污染时,IV 库区受到轻微影响。

综合来看,风场对主库区的污染物扩散的影响不大,对库湾区污染物扩散的影响较大。风场有利于库湾区污染物向其他相邻库区扩散。基于连通性矩阵,研究人员可识别某一库区受污染时,受影响较严重的库区分布,为后续污染物的治理提供依据。

3 结论

本文通过建立岗南水库水动力模型,探究了风场对水库流场、滞留时间及污染物扩散规律的影响,得出如下结论:

1) 风场使岗南水库整体的流速增大,库区内形成大小、方向不同的环流,各方向风场下环流的大小、位置均不相同。

2) 风场对岗南水库各库区滞留时间影响不同,风场使主库区的滞留时间增加,库湾区的滞留时间大幅度缩短,有助于改善水质。

3) 风场对库湾区污染物扩散的影响较大,有利于库湾区污染物向其他相邻库区扩散,进而促进库湾区水体进行交换。

参考文献:

- [1] GAO X P, XU L P, ZHANG C. Modelling the effect of water diversion projects on renewal capacity in an urban artificial lake in China[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2015, 17(6): 990-1002.
- [2] 王磊,廖国威,陈纯兴,等. 基于 MIKE 21 ECOLab 的调水型水库换水周期及富营养化模拟[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(5): 1548-1562.
WANG L, LIAO G W, CHEN C X, et al. Simulation of residence time and eutrophication in a pumped-storage reservoir based on MIKE 21 ECOLab[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(5): 1548-1562.
- [3] 许莉萍. 人工湖泊水质演变规律及水环境调控研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
XU L P. Research on evolution of water quality and water environmental regulation in an artificial lake[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [4] 张云昌, 王建华. 水库生态学构建中的十个基本问题[J]. *中国水利*, 2024(24): 26-32.
ZHANG Y C, WANG J H. Ten basic issues in the formation of reservoir ecology[J]. *China Water Resources*, 2024(24): 26-32.
- [5] XIONG J L, SHEN J, QIN Q B, et al. Water exchange and its relationships with external forcings and residence time in Chesapeake Bay[J]. *Journal of Marine Systems*, 2021, 215: 103497.
- [6] 石泳昊, 贾良文, 张恒. 湛江湾水体滞留时间及影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(11): 17-24.
SHI Y H, JIA L W, ZHANG H. Analysis of the water residence time and influencing factors in Zhanjiang Bay[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(11): 17-24.
- [7] 蒋文治, 季小梅, 张蔚, 等. 岸线变化和海平面抬升对珠江河口水体交换的影响[J]. *水运工程*, 2021(7): 19-26+52.
JIANG W Z, JI X M, ZHANG W, et al. Influence of coastline change and sea-level rise on water exchange in the Pearl River Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(7): 19-26+52.
- [8] GAO X P, XU L P, ZHANG C. Estimating renewal time-scales with residence time and connectivity in an urban man-made lake in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(14): 13973-13983.
- [9] YAO J, LI Y L, ZHANG D, et al. Wind effects on hy-

- drodynamics and implications for ecology in a hydraulically dominated river-lake floodplain system: Poyang Lake[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 103-113.
- [10] 叶群. 鄱阳湖水利枢纽调度对水体滞留时间及湖区用水影响分析[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- YE Q. The impact of the Poyang Lake hydraulic project on residence time and water supply [D]. Nanchang: Nanchang University of Technology, 2019.
- [11] 吴昊昊, 倪晋, 潘强. 基于 MIKE 21 的沱湖水动力及水体更新时间模型[J]. *水电能源科学*, 2025, 43(8): 47-51.
- WU H H, NI J, PAN Q. Model of Tuohu Lake dynamics and water renewal time based on MIKE 21 [J]. *Water Resources and Power*, 2025, 43(8): 47-51.
- [12] 张雅卓, 吕淑婷, 季廷翠. 城市边缘区河道景观生态修复策略研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4): 37-44.
- ZHANG Y Z, LYU S T, JI T C. Study on ecological restoration strategy of river landscape in urban fringe[J]. *Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition)*, 2019, 36(4): 37-44.
- [13] 尹莉媛, 王岩, 董琪伟, 等. 杨柳青古镇水岸空间夏季热环境特性研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(1): 97-105.
- YIN L Y, WANG Y, DONG Q W, et al. Study on thermal environment characteristics of waterfront space in Yangliuqing Ancient Town in summer [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41(1): 97-105.
- [14] 黄明, 马飞虎, 匡武, 等. 基于 MIKE 21 研究生态补水对巢湖水质时空分布的影响[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(4): 463-470+477.
- HUANG M, MA F H, KUANG W, et al. Study on the effect of ecological water replenishment on the spatial and temporal distribution of water quality in Chaohu Lake based on MIKE 21 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(4): 463-470+477.
- [15] 叶永, 陈雪倩, 汪旭. 基于 MIKE 21 水质与水动力模型的清江流域水质改善措施影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2025(4): 14-19.
- YE Y, CHEN X Q, WANG X. Research on the improvement of water quality based on MIKE 21 water quality and hydrodynamic model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(4): 14-19.
- [16] ZHANG K C, LI Q J, ZHANG J, et al. Simulation and analysis of back siltation in a navigation channel using MIKE 21 [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(4): 893-902.
- [17] ZHANG S X, HE H X, ZHANG B, et al. Water exchange and pollutant diffusion law in Gangnan Reservoir [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(12): 12259-12269.
- [18] JIA P, WANG Q G, LU X C, et al. Simulation of the effect of an oil refining project on the water environment using the MIKE 21 model [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 103: 1-10.
- [19] 张煜萨, 何胜男, 马建明, 等. 基于一、二维耦合水动力学方法的城区小流域山洪模拟——以北京市门头沟“23·7”暴雨山洪为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(3): 590-597.
- ZHANG Y S, HE S N, MA J M, et al. Urban small watershed flash flood simulation based on 1D-2D coupled hydrodynamic method: taking the "23·7" rainstorm and mountain flood in Mentougou, Beijing as an example [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2025, 23(3): 590-597.
- [20] 赵琰. 基于水动力学的城市浅水湖泊水质模拟研究——以七夕湖为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- ZHAO Y. Water quality simulation of urban shallow lakes based on hydrodynamics: a case study of Qixi Lake [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [21] 彭兴意. 基于 MIKE 21 的城市小型河流水环境模拟及水质提升研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- PENG X Y. Research on water environment simulation and water quality improvement of small urban rivers based on MIKE 21 [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.

(责任编辑 周雪梅)