

## 基于 MIKE21 ECOLab 的调水型水库换水周期及富营养化模拟\*

王磊, 廖国威, 陈纯兴, 冯杰, 尹雪, 齐秀娟

(深圳市环境科学研究院, 生态环境部饮用水水源地保护重点实验室, 深圳市饮用水水源地安全保障重点实验室, 深圳, 518000)

**摘要:** 基于 MIKE21 ECOLab 模块构建调水型水库水动力与富营养化二维模型, 探究提升模型率定效率的方法, 分析外调水主导下水库换水周期、氮磷营养盐以及叶绿素 a 间的时空变化特征。结果表明: ECOLab 模块中 9 个状态变量的率定顺序为:  $BOD > PO_4^{3-} = NH_4^+ > NO_2^- > NO_3^- > Chl-a = FC = TC > DO$ , 涉及到的 41 个参数中需要重点率定的有 11 个; 用 2022 年实测数据对模型进行了验证, 结果表明模型可以准确反应该水库的水动力及水质的变化情况; 以此为基础, 在年均调水量为 4.9 亿方条件下, 模拟得到水库换水平均周期为 9 d, 换水周期空间上具有较高的异质性, 主流方向上换水周期较短, 以主流方向为分界线, 换水周期向两侧递增, 增幅与离岸距离呈反比, 且在库湾处明显加大, 最长超过 200 d; 以调水水质为近 5 年的月度均值为边界条件, 模拟得到水库无机氮、无机磷及叶绿素 a 年均值分为 0.75 mg/L、1.93 ug/L 以及 20.93 ug/L; 时间上, 受东江流域面源输入季节性变化的影响, 丰水期氮、磷及叶绿素 a 浓度要高于枯水期; 空间上, 换水周期越小的区域, 氮、磷及叶绿素 a 与换水周期相关性越强, 氮、磷为负相关, 而叶绿素 a 为正相关。本研究成果可为降低水库富营养化模型构建成本提供参考, 同时为调水水库富营养化防治提供科学依据。

**关键词:** MIKE21 ECOLab; 换水周期; 富营养化; 调水型水库

### Simulation of residence time and eutrophication in Pumped-Storage Reservoir based on MIKE21 ECOLab

Wang Lei, Liao Guowei, Chen Chunxing, Feng Jie, Yin Xue, Qi Xiujian

(Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Key Laboratory for Protection of Drinking Water Sources, Ministry of Ecology and Environment, Shenzhen Key Laboratory for Safety Assurance of Drinking Water Sources, Shenzhen, 518000, China)

**Abstract:** The two-dimensional hydrodynamic and eutrophication model of a Pumped-Storage Reservoir was developed based on MIKE21 ECOLab, to investigate the methods of improving calibration efficiency, and to analyze the spatiotemporal pattern of

\*2024-08-26 收稿; 2024-12-12 收修改稿。

广东省深圳市科技研发资金 (KCXFZ20201221173007020) 和深圳市科技研发资金 (JCYJ20210324122400002) 联合资助

\*\* 通信作者; Email: 515855236@qq.com

residence time, nitrogen, phosphorus, and chlorophyll-a in the pumped-storage reservoir. The results indicate that the calibration sequence for 9 state variables in the ECOLab module is:  $BOD > PO_4^{3-} = NH_4^+ > NO_2^- > NO_3^- > Chl-a = FC = TC > DO$ , and 11 of the 41 parameters are primary calibration parameters. The model satisfactorily represented the hydrodynamic and water quality processes of the reservoir, by validating with actual measurement data from 2022. Using this model, the simulated average residence time of water in the reservoir is 9 days, given an annual water diversion volume of 490 million cubic meters. The residence time along the mainstream direction is relatively shorter, but it increases towards both sides, inversely proportional to the distance from the shore, indicating a high spatial variability. In reservoir bays, the residence time notably increases, reaching a peak of over 200 days. Based on observed water quality data of pumping water over the past five years, the simulation results indicate that the annual average concentrations of inorganic nitrogen, inorganic phosphorus, and chlorophyll-a are 0.75 mg/L, 1.93  $\mu\text{g/L}$ , and 20.93  $\mu\text{g/L}$ , respectively. Influenced by seasonal variations in non-point source pollution inputs from the Dongjiang River basin, the concentrations of nitrogen, phosphorus, and chlorophyll-a are higher during the wet season compared to the dry season. In regions with shorter residence times, nitrogen and phosphorus concentrations tend to increase, while chlorophyll-a concentrations tend to decrease. The outcomes of this study provide important information for model construction and eutrophication control in pumped-storage reservoirs.

Key words: MIKE21 ECOLab; Residence time; Eutrophication; Pumped-storage reservoir

水库作为集供水、防洪和灌溉等多功能为一体的水利工程，是实现城市水资源合理开发利用的有效途径<sup>[1]</sup>。在我国，大型城市水库主要水源来自外调水<sup>[2]</sup>，调水的同时大量的氮磷营养盐流入水库，易引起藻类的异常增殖导致水库富营养化发生，如天津于桥水库<sup>[3]</sup>、珠海大镜山水库<sup>[4]</sup>、深圳茜坑水库<sup>[5]</sup>等。如何量化外调水对水库的影响从而有针对性的制定经济高效的调控方案是水库富营养化治理的关键，而模型模拟是常用的研究方法。模型基于大量的实验和观测数据，在得到充分校验的基础上，可用于识别水库水动力及富营养化时空演变的驱动因素、量化外调水和水库富营养化间响应关系，为确定外调水营养物质的控制目标提供科学依据<sup>[6]</sup>。

上世纪 70 年代，第一个富营养化模型由 Vollenweide<sup>[7]</sup>提出，其主要关注营养物质的负荷与水体富营养化之间的关系，认为外部营养负荷决定了湖库营养状态，Vollenweide 模型推动了湖库富营养化模型研究的深入，众多学者在该模型的基础上进行了大量改进和运用，宋文林等<sup>[8]</sup>基于 Vollenweider-Dillon 模型测算出了武汉东湖和杭州西湖的磷浓度，Wu 等<sup>[9]</sup>利用改进 Vollenweide 模型估算了太湖、巢湖和鄱阳湖 60 年来的富营养变化情况。随着对湖库物理、化学、生物等机理过程的深入研究以及计算性能的提升，诸如 EFDC、MIKE21、DELFT3D、AQUATOX、WASP 等多变量、跨尺度的湖泊水动力-水质-水生态复杂机理模型在富营养化研究与控制决策中发挥了越来越重要的作用<sup>[10]</sup>。MIKE21 以其可视化程度高、操作相对简便的优势，被广泛的应用于河流、湖泊及近岸海域的水工建筑、防洪、水动力与水质的模拟<sup>[11]-[16]</sup>。MIKE21 ECOLab 模块可较好的模拟湖库藻类生长繁殖的物理与生化过程，涉及到众多状态变量，相关参数繁多且交互性强，因此建模数据需求庞大，建模时间成本与计算成本高昂，以往研究对该模块运用相对较少，且基本停留在应用层面<sup>[17]-[19]</sup>，对于如何降低建模成本以及模拟要素间复杂的响应关系鲜有描述。本研究基于 MIKE21 ECOLab 构建调水型水库水动力与富营养化二维模型，探究提升模型率定效率的方法，分析外调水主导下水库换水周期、氮磷营养盐以及叶绿素 a 间的变化特征，为降低水库富营养化模型构建成本提供参考，同时为调水型水库富营养化防治提供科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域概况

X 水库位于华南地区,属于亚热带季风气候,多年平均降雨量 1932.9mm,年平均气温 23.3℃,夏季盛行偏南风,高温多雨,秋冬季节盛行东北季风,干燥少雨。水库平均水深 11m,总库容 3523.66 万 m<sup>3</sup>,是大型境外引水工程东部供水工程<sup>[20]</sup>的输水枢纽,95%以上水源是由东部供水工程调取的东江水。当地政府部门为妥善处理城市发展与水源保护的问题,对水库开展了一系列水质保障工程,通过新建调蓄湖、输水隧洞、泵站等工程将原入库河流截排到水库外,改变了水库流域的汇水格局,有效削减了周边污染负荷,也使得东江几乎成为水库唯一水源,东江污染负荷对水库贡献率接近 100%。X 水库常年水质可达到湖库 II-III 类标准,保持优良水平,但 TLI(营养状态指数)逐年上升,几乎达到轻度富营养化水平(TLI 接近 50),主要由于人类活动以及自然条件变化,东江流域氮磷营养盐负荷水平居高不下<sup>[21]</sup>,使得水库面临着较高的富营养化风险。本研究通过模拟东江来水为唯一水源条件下 X 水库换水周期、氮磷营养盐以及叶绿素 a 间的变化规律与相关特征,以期有效改善水库水质、防止水华发生提供科学的决策支持,也为国内外同类型水库提供借鉴。

## 1.2 MIKE21 ECOLab

X 水库水源单一,地形坡度较为平缓,水流状态相对稳定,考虑到水库本身特征、基础数据可用性,为分析水库平面二维空间的水动力及富营养化变化特征,本研究采用二维模型。MIKE 21 模型是由 DHI Water & Environment 机构开发研究的专业二维自由水体流动模拟系统工程商业软件<sup>[13]</sup>,ECOLab 是 DHI 在 MIKE 21 基础上开发的更为先进的生态模型,既可以描述物理沉降过程,也可以描述化学、生物、生态过程以及状态变量之间的相互作用。DHI 将生态模型的经验 and 知识都集成在预定义的 ECO Lab 内置的模板中,用户可在模板基础上修改参数,也可以根据需要进行修改模板内的过程或者自定义新的模板<sup>[18]</sup>。本研究使用的是 ECO Lab 内置的 WQ with nutrients and chlorophyll-a 模板,共包含 9 个状态变量(五日生化需氧量(BOD)、溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chl-a)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)、粪大肠杆菌(FC)、总大肠杆菌(TC))以及 41 个参数(表 1)。

## 1.3 网格划分

采用无人船巡航测量 X 水库水下地形,并从水库卫星影像提取岸边界轮廓。将处理后的水下地形文件与岸边界文件导入 MIKE 软件自带的网格生成器,进行网格剖分、平滑网格、水下地形插值,最后共生成 2228 网格个节点,3940 个三角形网格(图 1)。

## 1.4 设计条件确定

1.4.1 初始条件 模型计算初始时间为 2021 年 1 月 1 日 0 点。初始流速为 0,初始水位为 2021 年 1 月 1 日当天的实测水位。富营养化模块中 BOD、DO、Chl-a、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、FC 的初始值采用 2021 年 1 月的监测值,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、TC 均无实测数据,根据相关文献<sup>[22]-[27]</sup>确定同类水体中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>比例浓度约为 23:1、TP(总磷)与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>浓度比例约为 7:1,FC 与 TC 浓度比例约为 0.75:1,通过实测的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、TP 以及 FC 据按上述比例换算得到 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、TC 初始条件。

1.4.2 水动力模块(HD) 边界条件 共有 4 个边界,包括 1 个入流边界,3 个出流边界(图 1)。入流边界为东部供水工程来水,位于水库东北角,年均来水量约 4.9 亿 m<sup>3</sup>;出流边界包括:去水口、取水口以及泄洪口,去水口位于水库西侧,其功能为往其他水库输水,年均输水量约 4.2 亿 m<sup>3</sup>,取水口位于南侧,主要为周边自来水厂供水,来水口、去水口以及取水口均采用 2021-2022 年逐日实测流量数据。泄洪口位于东南侧,泄洪闸受人为控制,一般在汛期来临前开闸,将水位降低至安全水位,根据水量守恒原则,本研究利用库容变化情况反推泄洪流量。降雨采用 X 水库 2021-2022 年逐日监测数据,由于蒸发量无实测数据,

因此采用当地年均蒸发数据；风向、风速数据为 X 水库 2021-2022 年逐时监测数据。

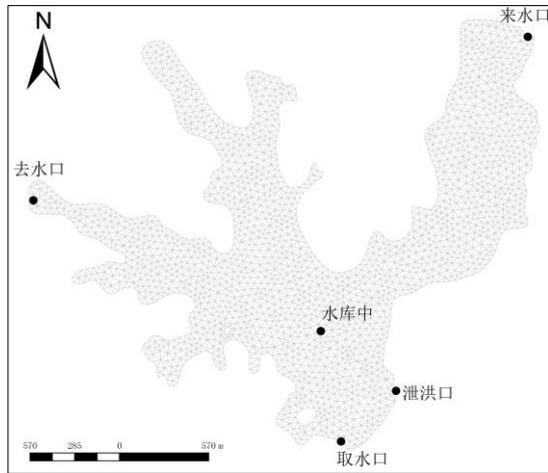


图 1 网格划分及边界条件  
Fig.1 Mesh and boundary conditions

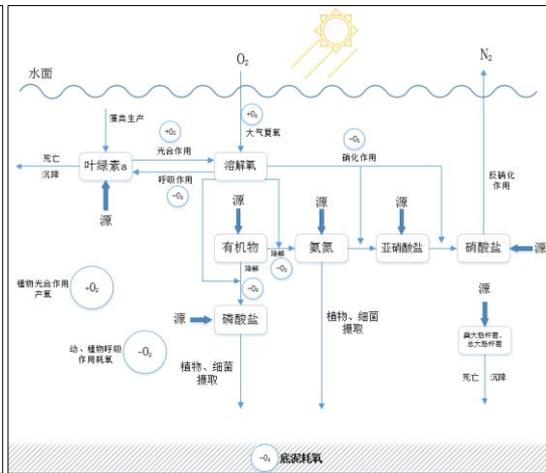


图 2 各状态变量生化过程  
Fig.2 Biochemical process of state variables

1.4.3 富营养化模块 (ECOLab) 边界条件 来水口 BOD、DO、Chl-a、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、FC 的水质数据采用逐月实测数据，并采用内插法将水质数据时间与流量时间同步， $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、TC 边界条件分别通过  $\text{NO}_3^-$ 、TP 以及 FC 按前文提及的比例换算得到。

1.4.4 时间步长 时间步长的选取一方面要满足模型计算稳定性要求，具体体现为 CFL (收敛条件判断数) 小于 1，另一方面要考虑模型计算效率<sup>[14]</sup>。模型计算时段为 2021-2022 年，计算时长为 2 年，经过反复调试与试算，在既能保证模型稳定计算又能提高计算效率的条件下，将时间步长定为 30s，总计步数为 2102400 步。

1.4.5 其他 考虑到水温对水体富营养化的影响<sup>[28]</sup>，在富营养化模块驱动力中，将水温设置为随时间变化的参数，并加载与水动力模块时间同步的实测水温值；其他水动力及富营养化模块设置及相关参数均采用默认值。

### 1.5 率定与验证

1.5.1 水动力模块 率定期为 2021 年，水动力模块主要参数为底床糙率，其设定分三种形式：无底床阻力、谢才系数和曼宁系数<sup>[29]</sup>，本次模拟选择曼宁系数，经过率定，X 水库曼宁系数取值为  $32\text{m}^{1/3}/\text{s}$ 。

验证期为 2022 年，采用 X 水库水位站实测水位数据进行验证 (图 3)，计算值的水位变化趋势与实测值高度一致，确定系数 ( $R^2$ ) 为 0.97，计算值与实测值吻合程度好，表明所建立的模型能较好的用于 X 水库水动力的模拟计算。

1.5.2 富营养化模块 采用 X 水库库中 (图 1) 逐月监测数据进行率定。率定期为 2021 年，富营养化模块 9 个状态变量共涉及 41 个参数，由于参数较多，率定前对各项参数进行敏感度分析。具体方法为：参考模型对各参数取值范围，将某一参数分别调整至其上限/下限，其他参数不变，运行模型得到各状态变量的变幅  $\Delta S$  ( $\Delta S = (\text{状态变量取值下限时模型运行结果} - \text{状态变量取值上限时模型运行结果}) \div \text{状态变量取值上限时模型运行结果}$ )，便可确定状态变量主要影响参数，参数正/负影响程度，从而缩小调参范围。表 1 统计了影响 9 个状态变量变化的关键参数，可以看出对相关状态变量影响程度较大的共有 11 个参数，包括：BOD 一级降解速率 ( $k_d3$ )、硝化作用一阶降解速率 ( $k_4$ )、硝化作用二阶降解速率 ( $k_7$ )、植物呼吸速

率 (resp)、BOD 降解生成氮的量 (y2d)、BOD 降解生成磷的量 (y3d)、磷半饱和浓度对藻类与植物光合作用的限制系数 (ksp)、叶绿素 a 的死亡速率 (k8)、叶绿素 a 的沉降速率 (k9)、粪大肠杆菌一级衰减速率 (KcoliF)、总大肠杆菌一级衰减速率 (KcoliT)。

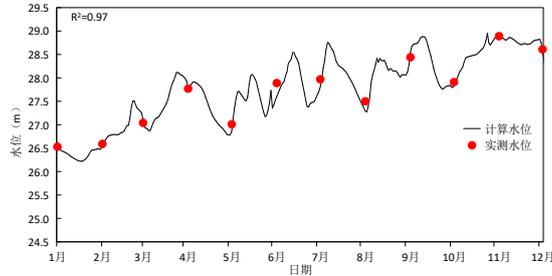


图 3 水位验证

Fig.3 Validation of water levels

从附表 1 可以看出某些参数的变化会对多个状态变量造成影响,例如 kd3 的升高,会导致 BOD 降低,  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 及  $\text{PO}_4^{3-}$ 升高。为进一步提高调参效率,根据各状态变量的生化原理确定其率定顺序,当率定完上一状态变量后,影响其变化的关键参数不再做调整,再对其他参数做调整来改变下一状态变量的值。通过分析 WQ with nutrients and chlorophyll-a 模板各状态变量生化过程的描述<sup>[30]</sup>,得到各状态变量相互影响关系(图 2): BOD 反映水体中有机物含量,微生物分解水体中有机物产生  $\text{NH}_4^+$ 以及  $\text{PO}_4^{3-}$ ,因此  $\text{NH}_4^+$ 以及  $\text{PO}_4^{3-}$ 的变化受到 BOD 的影响,而 BOD 的变化过程不受  $\text{NH}_4^+$ 以及  $\text{PO}_4^{3-}$ 的影响,BOD 的率定顺序优先于  $\text{NH}_4^+$ 以及  $\text{PO}_4^{3-}$ ,而  $\text{NH}_4^+$ 与  $\text{PO}_4^{3-}$ 互不影响,故二者率定顺序可同步。基于以上,确定率定顺序为  $\text{BOD} > \text{PO}_4^{3-} = \text{NH}_4^+$ 。根据水体 N 元素的硝化作用,可确定  $\text{NH}_4^+ > \text{NO}_2^- > \text{NO}_3^-$ ,Chl-a 的生化作用受 N、P 影响,因此其率定顺序在 N、P 之后,FC 与 TC 为独立的生化系统且互不影响,率定顺序可与 Chl-a 同步,DO 将整个生化系统串联起来,受所有变量的影响,率定顺序应在最后。最终确定整体率定顺序为  $\text{BOD} > \text{PO}_4^{3-} = \text{NH}_4^+ > \text{NO}_2^- > \text{NO}_3^- > \text{Chl-a} = \text{FC} = \text{TC} > \text{DO}$ 。率定得到 X 水库 41 个参数取值如附表 1 所示。

选取水库中以及取水口(图 1)两个代表性点位作为验证点,采用 2022 年 1-12 月逐月的实测值与计算值进行对比(图 4),各状态变量计算值与实测值变化趋势基本一致,计算得到水库中与取水口 BOD、DO、Chl-a、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、FC 的确定系数 ( $R^2$ ) 分别在 0.40-0.95 以及 0.46-0.85 间,计算值与实测值吻合程度较好,表明所建立的模型能较好的用于 X 水库富营养化的模拟计算。

## 2 换水周期特征分析

对于湖库的水体交换能力有诸多定义,早在 1972 年 Bolin 等<sup>[31]</sup>就介绍了水库的水龄、水力停留时间、水体置换时间等相关概念,并首次提出这些概念能否准确反映水库的水体交换能力,取决于水库规模、面积、去水口以及来水口相对位置等自身特性。本研究参考唐继张<sup>[15]</sup>、薛联青<sup>[32]</sup>以及李云良<sup>[16]</sup>等人公认的研究成果,以换水周期表征湖库的水体交换能力,换水周期为可溶性保守物质经过水流对流扩散作用,衰减至初始浓度的 37%所需的时间。X 水库的换水周期具体计算方式如下:

基于已建立的水库水动力模型,耦合 MIKE21 Transport 模块(对流扩散模块),将初始浓度场设置为 100 mg/L,各入库水质边界条件均设置为 0,降解系数取 0,模拟时长为 1 年,来水量为 4.9 亿  $\text{m}^3$ ,通过监测每个网格单元浓度的变化情况,记录其浓度降低至 37 mg/L 所需的时间,便可获得水库换水周期的空间分布情况。

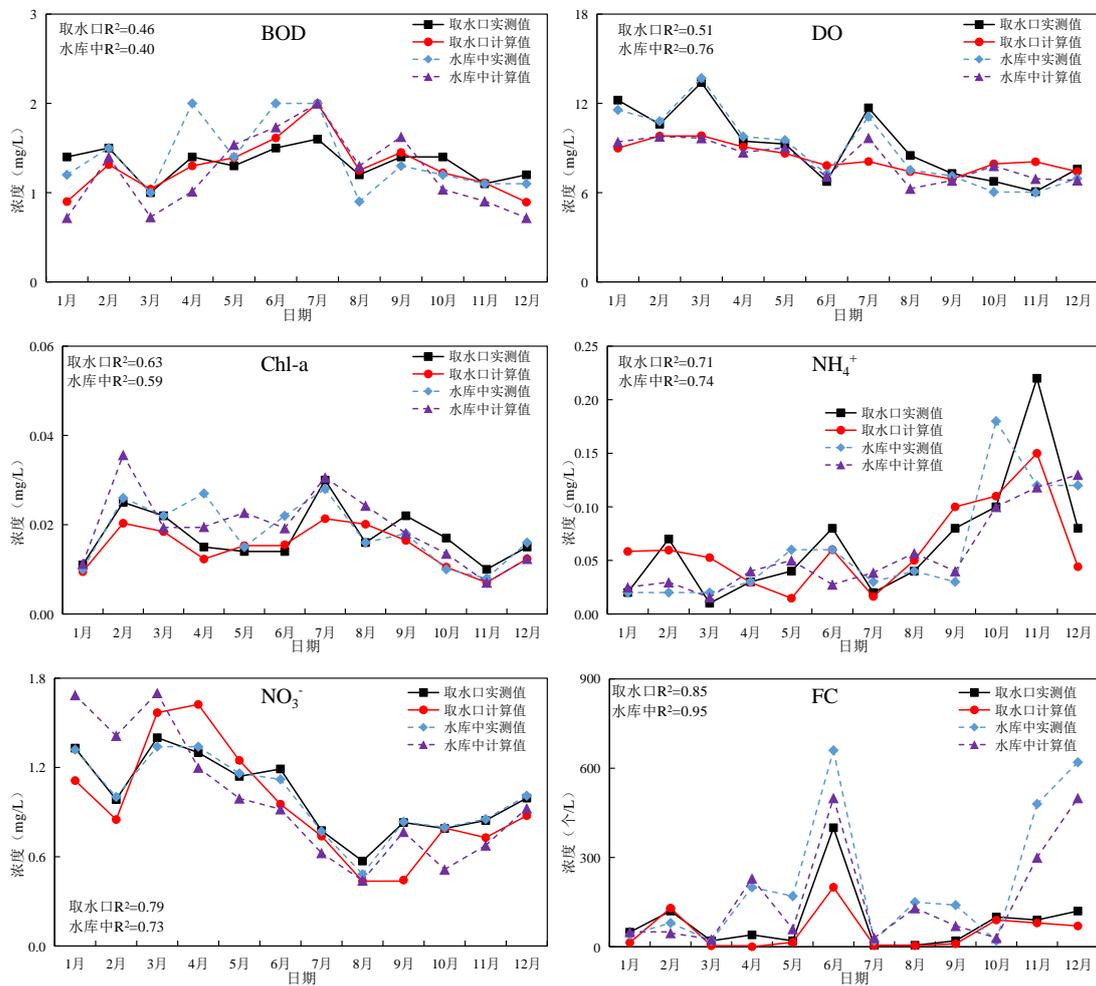


图4 水质验证

Fig.4 Validation of water quality

X 水库平均换水周期为 9 d，根据换水周期空间分布（图 5）将水库分为 4 个区域：<5 d 区域，占比 36%，主要位于东北库区，受东部供水工程来水驱动力影响，换水周期短；5-15 d 区域，占比 42%，分布在去水口、库中心等主流线上一带，主要受来水与去水形成的主流影响，换水周期较短；15-25 d 区域，占比 21%，分布在取水口、泄洪口以及中北部库区，上述区域距主流较远，驱动力较弱，主要依靠风、环流等带动水体交换；>25 d 区域，占比 1%，分布于库湾处，受地形影响，严重缺乏驱动力，换水周期较长。部分区域（图 5 深红色区域）换水周期超过 200 d，主要因库湾深处三面岸边界阻拦，无论是水流还是风都产生不了较强的驱动力，导致其水动力很弱，需要较长时间才能完成一次换水。总体来看，受来水和去水影响，X 水库主流方向为自东北向西，主流区域（包括东北来水口库区、西部去水口库区以及库中心等）换水周期较短。以主流方向为分界线，换水周期向两侧递增，增幅与离岸距离呈反比且在库湾处明显加大。因此，X 水库换水周期具有较高的空间异质性，在水源地保护工作中应将主流区和库湾区等换水周期差异明显的区域加以区分，相应地在库区水环境治理以及水资源调度管理手段上体现差异。

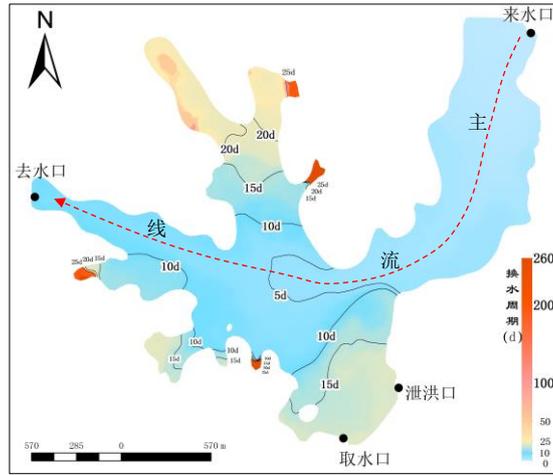


图 5 换水周期

Fig. 5 Residence time

### 3 富营养化特征分析

对无机氮 (DIN)、无机磷 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 及叶绿素 a (Chl-a) 的时空演变分析, 能够更全面地掌握水体浮游植物动态变化及形成机制, 更加准确地研判水生态环境的演变趋势<sup>[33][34]</sup>。本研究利用已建立的水库水动力与富营养化二维模型, 模拟年均来水量为 4.9 亿  $\text{m}^3$ , 水质边界条件为近 5 年各月平均值 (图 6) 的情况下, 丰水期 (4-9 月)、枯水期 (1-3 月及 10-12 月) 水库氮、磷以及叶绿素 a 特征规律, 分析换水周期与富营养化间的相关性, 以期有效改善水库水质防止水华发生提供科学的决策支持。

#### 3.1 氮、磷营养盐时空变化分析

由表 2 可知, X 水库 DIN 年均浓度为 0.75 mg/L, 处于轻度富营养化以下水平。从时间来看, 丰水期 DIN 浓度均值为 1.02 mg/L, 其中 4-6 月均值为 1.37 mg/L, 轻度富营养的区域占比 45.4%, 主要分布于东部库区, 7-9 月均值为 0.68 mg/L, 轻度富营养的区域占比 5.0%; 枯水期 DIN 浓度均值为 0.47 mg/L, 1-3 月、10-12 月浓度均值分别为 0.56 mg/L、0.39 mg/L, 所有区域均为轻度富营养以下。水库丰水期 DIN 浓度高于枯水期, 且第二季度明显高于其他季度。李星<sup>[35]</sup>王夏童<sup>[36]</sup>对东江流域的研究表明, 受季节性面源输入影响, 东江流域丰水期 DIN 浓度要显著大于枯水期。根据来水口  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  变化情况 (图 6), 4 月份  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  均偏高, 5、6 月份  $\text{NH}_4^+$  虽有所下降, 但  $\text{NO}_3^-$  依然维持比较高的水平, 且  $\text{NO}_3^-$  为 DIN 的主要成分<sup>[36]</sup>, 因此, 可以认为东江季节性面源污染输入导致来水口 DIN 浓度波动, 是水库 DIN 浓度季节变化的主要原因。

从空间规律来看 (图 7), X 水库 DIN 浓度与换水周期空间分布特征相似程度较高, 相同时段, 库区东北侧来水口为 DIN 浓度最高区域, 其次为自东北向西的主流一带, 浓度相对较低的区域为北部与西南部库湾地区。提取水库各空间单元格所对应的 DIN 浓度与换水周期, 并绘制散点图 (图 8), 可以看出 DIN 与换水周期拟合曲线呈对数分布, 为负相关, 且换水周期越小, 二者相关性越强, DIN 浓度越高。主要因换水周期小的区域水动力迁移扩散快<sup>[16]</sup>, 东江来水中 DIN 到达该区域时间短, 影响大, 浓度高, 反之则影响小, 浓度低。同时, 调水产生的水动力扰动导致沉积物中赋存的营养物质重新释放到水体中<sup>[37]</sup>, 进一步增加了换水周期较小区域的 DIN 浓度。

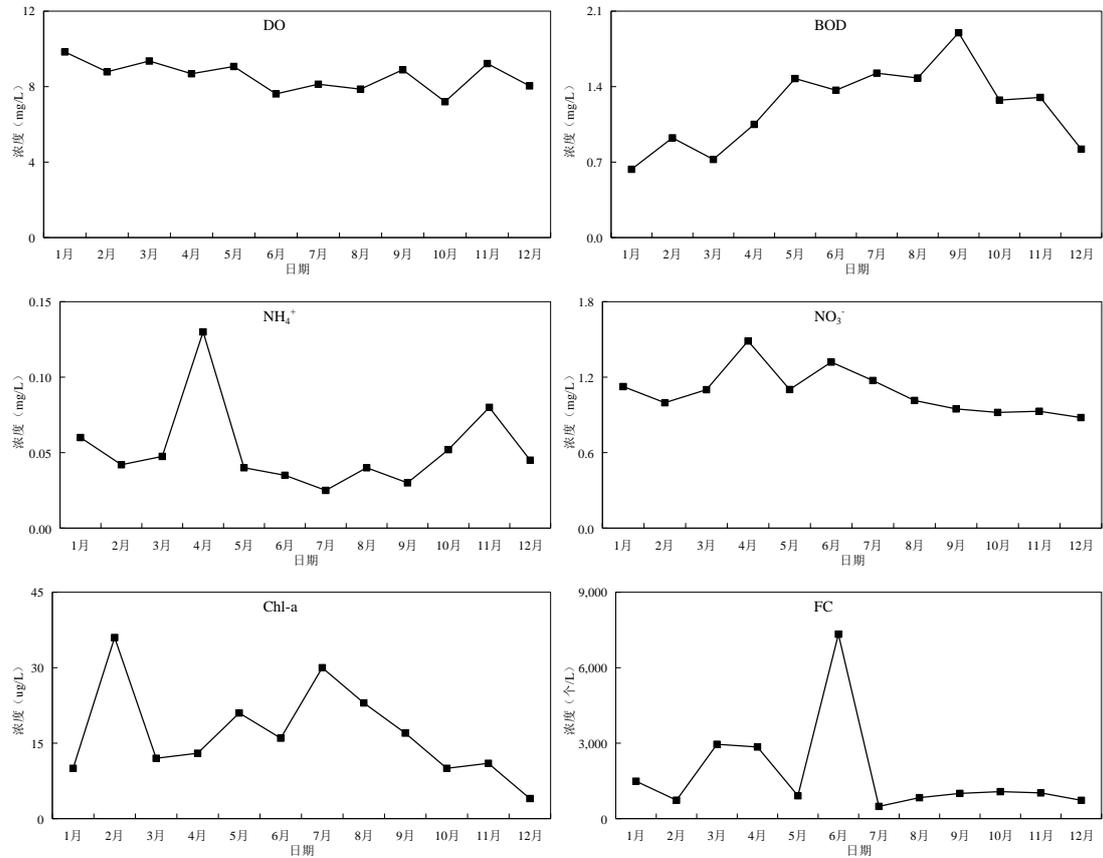


图 6 水质边界条件

Fig.6 Boundary conditions of water quality

由表 1 可知, X 水库 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>年度均值为 1.93 ug/L, 低于贫营养阈值 (<30 ug/L)。PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>浓度丰水期与枯水期浓度变化规律与 DIN 类似, 丰水期 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>浓度均值为 2.64 ug/L, 高于枯水期 1.21 ug/L, 所有区域 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>浓度低于贫营养阈值。空间分布规律与 DIN 相似 (图 7、图 8), 换水周期越大的区域, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>与换水

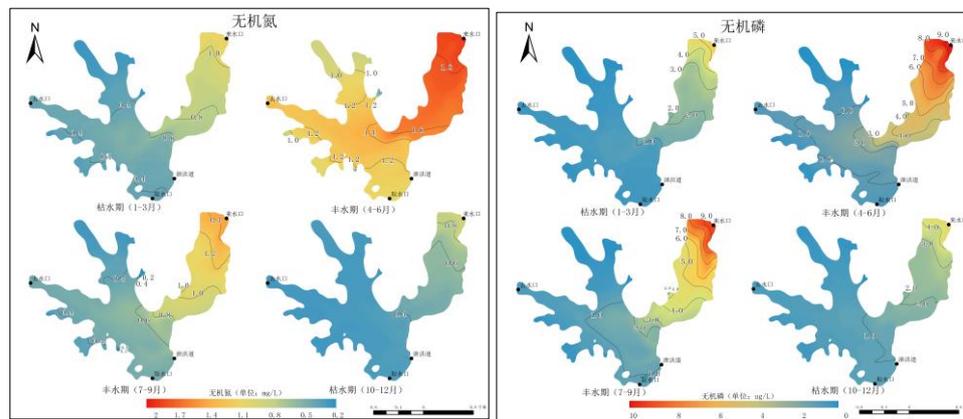


图 7 无机氮、无机磷时空分布情况

Fig. 7 Spatial-temporal pattern of DIN and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>

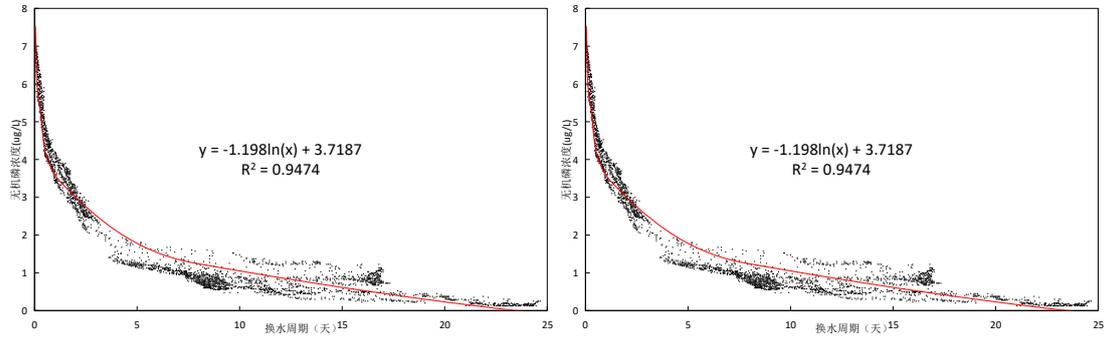


图 8 空间相关性

Fig.8 Spatial correlation

表 1 富营养化状态分布特征

Tab.1 Distribution characteristics of eutrophication

污染物 (单 位)	浓度 范围	营养状态等级	参考 文献	面积占比			
				枯水期		丰水期	
				1-3 月	10-12 月	4-6 月	7-9 月
无机氮 (mg/L)	≤1.3	轻度富营养以下	[38]	100.0%	100.0%	54.6%	95.0%
	1.3~3.0	轻度富营养		0.0%	0.0%	45.4%	5.0%
	>3.0	中度富营养		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		均值		0.56	0.39	1.37	0.68
无机磷 (ug/L)	≤30	贫营养	[39]	100%	100%	100%	100%
	30~45	中营养		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	>45	富营养		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		均值		1.11	1.31	2.97	2.31
叶绿素 a (ug/L)	≤10	中营养	[40]	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%
	10~30	轻度富营养		100.0%	94.7%	100.0%	100.0%
	>30	中度富营养		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		均值		22.52	12.46	22.40	26.34

周期相关性越弱，受东江来水影响越小，浓度越低。

X 水库作为以东江为主要水源的调水型水库，其氮磷浓度时间变化规律受东江来水影响，表现为丰水期高于枯水期，4-6 月份最高。调水不仅是水库换水周期的主要驱动因素，也是氮、磷等营养盐的输入因素，因此换水周期越小的区域，氮、磷与调水相关性越强，其浓度越高。在东江来水为主要水源条件下，要控制水库氮磷营养盐浓度，可在保障供水的前提下尽量减少 4-6 月的东江引水量，同时条件允许情况下可在东北库区等换水周期较大的区域种植吸收氮磷的水生植物。

### 3.2 叶绿素 a 时空变化分析

由表 1 可知，X 水库 Chl-a 全年浓度均值 20.93 ug/L，处于轻度富营养水平。从时间规律来看，丰水期浓度均值为 24.4 ug/L，其中：4-6 月均值为 22.40 ug/L，7-9 月均值为 26.34 ug/L，丰水期所有区域均处于轻度富营养水平。枯水期浓度均值为 17.49 ug/L，达到轻度富营养程度，其中：1-3 月均值为 22.52 ug/L，所有区域均处于轻度富营养水平，10-12 月均值为 12.46 ug/L，中营养区域占比 5.3%，轻度富营养区域占比 94.7%。水库丰水期 Chl-a 浓度要高于枯水期，与来水口 Chl-a 的变化趋势（图 6）高度一致，7-9 月浓

度最高，10-12月浓度最低，1-3月与4-6月浓度相当。田时弥等<sup>[41]</sup>研究表明东江 Chl-a 含量随时间变化明显，丰水期含量要显著高于枯水期，原因在于丰水期降雨径流带来的营养盐以及水温的升高在一定程度上刺激了浮游植物的生长，故可以认为东江来水是水库 Chl-a 浓度季节变化的主要驱动因素。从浓度大小来看，水库 Chl-a 浓度较来水低 4ug/L 左右，表明水库藻类的生长速率要大于其衰亡速率，是水库 Chl-a 浓度变化的次要驱动因素。

从空间上来看，各时间段浓度空间分布基本一致（图 9），整体由东北向西递增，东北侧来水口浓度相对较低，西侧去水口浓度相对较高，北库区、西库区与中心区差别不大，浓度最高的区域位于库湾处。根据各空间网格所对应的 Chl-a 浓度与换水周期散点图（图 10），Chl-a 与换水周期拟合曲线呈对数分布，为正相关，换水周期越小的区域，水动力越强，Chl-a 与换水周期相关程度越高，Chl-a 浓度越低，反之换水周期越大的区域，水动力越弱，Chl-a 与换水周期相关程度越低，Chl-a 浓度越高。李飞鹏等<sup>[34]</sup>认为较大强度的水动力条件能够对浮游植物生长产生显著的抑制作用，Vera Istvánovic 等<sup>[42]</sup>研究表明流量和 Chl-a 存在反比关系，这与本文研究成果一致。因此，在空间上可以适当改善 X 水库库湾处等换水周期较长区域的水动力，可较好的抑制浮游植物生长，降低 Chl-a 浓度。

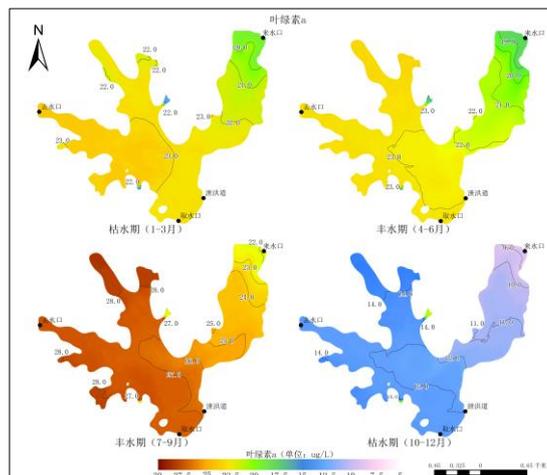


图 9 叶绿素 a 时空分布情况

Fig. 9 Spatial-temporal pattern of Chl-a

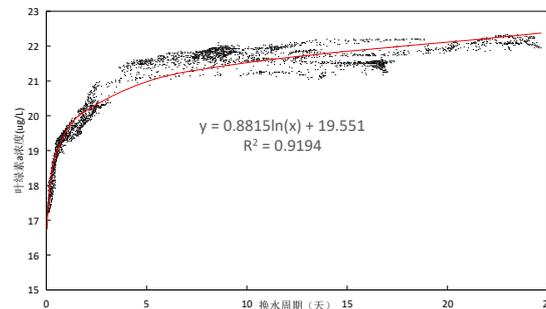


图 10 空间相关性

Fig.10 Spatial correlation

## 4 结论

本文基于 MIKE21 ECOLab, 构建 X 水库水动力与富营养化二维模型, 探究提升模型率定效率的方法, 分析外调水主导下水库换水周期、氮磷营养盐以及叶绿素 a 间的变化特征。研究成果可为降低富营养化模型构建的时间成本与计算成本提供参考, 同时为有效改善 X 水库水质、降低富营养化风险提供科学的决策支持。主要结论如下:

(1) MIKE21 ECOLab 模块共有 9 个状态变量, 涉及 41 个参数, 状态变量率定顺序为:  $BOD > PO_4^{3-} = NH_4^+ > NO_2^- > NO_3^- > Chl-a = FC = TC > DO$ , 需要重点率定的参数有 11 个。验证结果表明各状态变量计算值与实测值吻合程度较好, 所建立的模型能较好的用于 X 水库富营养化的模拟计算。

(2) X 水库平均换水周期为 9 d, 换水周期具有较高的空间异质性, 主流方向上换水周期较短, 以主流方向为分界线, 换水周期向两侧递增, 增幅与离岸距离呈反比且在库湾处明显加大, 最长超过 200 d。

(3) X 水库无机氮、无机磷年均值分别为 0.75 mg/L、1.93 ug/L; 时间上, 丰水期浓度要高于枯水期, 东江季节性面源污染输入, 导致来水口氮磷浓度的波动, 是水库氮磷季节变化的主要原因; 空间上, 换水周期越小的区域, 氮磷与换水周期相关性越强, 受东江来水影响越大, 浓度越高。

(4) X 水库叶绿素 a 年均值为 20.93 ug/L, 整体高于来水浓度, 表明水库藻类的生长速率要大于其衰亡速率; 时间上, 丰水期浓度要高于枯水期, 原因在于丰水期东江流域降雨径流带来的营养盐以及水温的升高在一定程度上刺激了浮游植物的生长; 空间上, 换水周期越小的区域, 水动力越强, 叶绿素 a 与换水周期相关程度越高, 浓度越低。

## 5 附件

附表 I 见电子版 (doi:10.18307/2025.0515)。

## 6 参考文献

- [1] 张晓阳. 珠江三角洲城水关系演进特征、机制及规划干预研究[学位论文]. 华南理工大学, 2021.
- [2] 才惠莲. 我国跨流域调水水权管理准市场模式研究[学位论文]. 中国地质大学, 2013.
- [3] 徐良. 于桥水库富营养化问题数值模拟研究[学位论文]. 天津大学, 2012.
- [4] 张华俊, 李秋华, 韩博平. 南亚热带典型调水型水库——广东大镜山水库的富营养化特征分析. 湖泊科学, 2010, 22(02): 291-299.
- [5] 肖舒元. 封闭式引调水库的水环境模拟及藻华防控研究[学位论文]. 华南理工大学, 2021.
- [6] Mooij W M, Trolle D, Jeppesen E, et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquatic Ecology*, 2010, 44(3): 633-667.
- [7] Vollenweider R A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, Dott. Marco de Marchi Verbania Pallanza, 1976, 33.
- [8] 宋文林, 彭近新. 湖泊富营养化与磷模型预测. *环境科学与技术*, 1983, (01): 37-42.
- [9] Wu P, Qin B, Yu G. Estimates of long-term water total phosphorus (TP) concentrations in three large shallow lakes in the Yangtze River basin, China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016.
- [10] 刘永, 蒋青松, 梁中耀, 等. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展. *湖泊科学*, 2021, 33(01): 49-63.
- [11] Jin Y, Du J, Gu D, et al. Numerical Simulation for Optimization of the Water Intake-Outlet Arrangements for Seawater Desalination Plants Based on MIKE21: A Case Study of Laoshan Bay, Qingdao. *Water*, 2023, 15(13).

- [12] Xu C, Ren Z, Huang S, et al. Simulation Study on the Impact of Water Flow Regulation Based on the MIKE 21 Model in a River Water Environment. *Sustainability*, 2023, 15(13).
- [13] 唐崇熙. 基于 MIKE 21 的白洋淀水动力与水质数值模拟研究[学位论文]. 天津工业大学, 2022.
- [14] 李大鸣, 卜世龙, 顾利军等. 基于 MIKE 21 模型的洋河水库水质模拟. *安全与环境学报*, 2018, 18(03): 1094-1100.
- [15] 唐继张, 周维博, 安宝军等. 基于 MIKE21 的西安昆明池(试验段)换水能力特征研究. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(01): 58-63.
- [16] 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. *湖泊科学*, 2017, 29(01): 32-42.
- [17] 李亚娟, 杜彦良, 毕二平, 等. 妫水河湿地植物作用及调水水质响应模拟. *环境科学*, 2020, 41(09): 4095-4104.
- [18] 龚依琳. 基于 ECOLab 的澜沧江小湾水库水质模拟研究[学位论文]. 西安理工大学, 2019.
- [19] Nugroho A R, Akhwady R, Metakaryanto D, et al. Studi Model Distribusi Pencemaran di Pantai Utara Jawa Tengah Menggunakan Model MIKE 21 ECOLab. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 2016, 8(2): 89-100.
- [20] 肖桂明. 深圳东部供水二期工程几个技术问题的研究处理. *广东水利水电*, 2015, (03): 29-31.
- [21] 曹敏, 吴东少, 段仲昭, 等. 亚热带流域人类活动净氮输入与河流输出响应——以东江为例. *环境科学学报*, 2023, 43(08): 428-439.
- [22] 赵文斌. 上游水库水体中氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总氮的测定和关系探究. *分析测试技术与仪器*, 2022, 28(02): 222-227.
- [23] 张雷. 地表水总氮、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮的关系探究. *绿色科技*, 2018(10): 111-112+114.
- [24] 钱天鸣, 陈超, 程咏. 杭州西湖水体生态环境参数的相互关系. *中国环境监测*, 2002(03): 41-44.
- [25] 张耀. 红枫湖水体氮、磷时空分布及影响因素分析[学位论文]. 贵州师范大学, 2019.
- [26] 朱慧. 鄱阳湖流域肠道病毒及细菌指示物的研究[学位论文]. 南昌大学, 2018.
- [27] 孙傅, 沙婧, 刘彦华. 南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究. *环境科学*, 2012, 33(11).
- [28] Ruipeng J, Ming D, Jingquan B, et al. Analyzing factors driving of eutrophication of river-type urban landscape lakes.. *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation*, 2023, 95(7).
- [29] 尹迎身. 基于水质改善的水动力优化方案研究[学位论文]. 郑州大学, 2022.
- [30] DHI, Water Quality MIKE ECO Lab WQ Templates Scientific Description. <https://manuals.mikepoweredbydhi.com>, 2017
- [31] Bolin B , Rodhe H . A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, 1973, 25(1): 58-62.
- [32] 薛联青, 沈海岑, 张敏, 等. 洪泽湖换水能力的时空分布特征. *水资源保护*, 2022, 38(04): 13-20.
- [33] Bellinger G E , Sigee D . *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicator*. 2010.
- [34] 李飞鹏, 张海平, 陈玲. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究. *环境科学*, 2013, 34(10): 3854-3861.
- [35] 李星, 杨扬, 乔永民, 等. 东江干流水体氮的时空变化特征及来源分析. *环境科学学报*, 2015, 35(07): 2143-2149.
- [36] 王夏童. 东江流域氮污染的时空格局变化及其来源解析[学位论文]. 西安工程大学, 2021.
- [37] 程浩淼, 王安安, 张健, 等. 调水工程对过水性湖泊中污染物迁移转化的影响. *人民长江*, 2023, 54(03): 49-55+71.
- [38] 陈黎黎. 珠三角典型富营养化状态湖库的氮形态研究[学位论文]. 暨南大学, 2015.
- [39] 郭红兵. 城市水体营养物迁移转化规律与富营养化主控因子研究[学位论文]. 西安建筑科技大学, 2016.
- [40] 娄保锋, 周正, 苏海, 等. 鄱阳湖营养水平关键指标时空分布特征及适宜控制标准. *湖泊科学*, 2023, 35(03): 897-909.
- [41] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2015, 27(01): 31-37.
- [42] Vera Istvánovic, Márk Honti. Phytoplankton growth in three rivers: The role of meroplankton and the benthic retention hypothesis. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(4).

附表 1 敏感度分析结果  
Appendix Tab.1 Results of sensitivity analysis

参数	参数描述	取值范围	单位	敏感度分析							
				BOD	DO	CHL	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	FC
kd3	BOD 过程: 一阶降解速率	0-5	(/d)	☆☆☆			★★★★	★★★		★★★★★	
tetad3	BOD 过程: 降解速率温度系数	1-1.2	无单位	★★★							
hdobod	BOD 过程: 半饱和和氧浓度	0-20	mg/l	★★★			☆	☆		☆	
SD	DO 过程: 透明度	0-50	m								
pmax	DO 过程: 正午最大氧气产生量	0-40	(/d)		★★	★★	☆☆	☆☆			☆☆
fi	DO 过程: 正午时间修正	-3-3	hour								
resp	DO 过程: 植物呼吸速率	0-30	(/d)	★★	☆☆	☆☆	★★★★	★★★			★★★
teta2	DO 过程: 呼吸速率温度系数	1-1.2	无单位								
mdo	DO 过程: 呼吸作用半饱和和浓度	0-4	mg/l								
B1Sed	DO 过程: 单位面积 (m <sup>2</sup> ) 底泥耗氧量	0-30	(/d)	★★	☆☆						
tetab1	DO 过程: 底泥耗氧速率温度系数	1-1.2	无单位								
mdosed	DO 过程: 底泥耗氧半饱和和浓度	0-4	mg/l								
k4	硝化过程: 硝化作用一阶降解速率	0-10	(/d)				☆☆	★★★★★			
k7	硝化过程: 硝化作用二阶降解速率	0-2	(/d)					☆☆	★★★★★		
teta4	硝化过程: 硝化作用一阶温度系数	1-1.2	无单位					☆			
teta7	硝化过程: 硝化作用二阶温度系数	1-1.2	无单位					★★			
y1	硝化过程: 硝化作用一阶耗氧量	3.42-3.42	g O <sub>2</sub> /g NH <sub>4</sub> -N								
y2	硝化过程: 硝化作用二阶耗氧量	1.14-1.14	g O <sub>2</sub> /g NO <sub>2</sub> -N								
hdonit	硝化过程: 硝化作用半饱和和浓度	0-20	mg/l					★			
y2d	氨氮过程: BOD 降解生成氨氮的量	0-2	g NH <sub>4</sub> -N/g BOD				★★★★★	★★★★★			
Nplant	氨氮过程: 植物固氮量	0-0.2	g N/g DO				☆☆	☆☆			
Nbact	氨氮过程: 细菌固氮量	0-1	g N/g DO				☆☆	☆☆			
hsnh4	氨氮过程: 固氮作用半饱和和浓度	0-5	mg/l				★★	★★			
k6	反硝化过程: 反硝化速率	0-10	(/d)						☆☆		
teta6	反硝化过程: 反硝化速率温度系数	1-1.4	无单位						★★		
y3d	磷过程: BOD 降解生成磷的量	0-0.1	g P/g BOD								★★★★★
Pplant	磷过程: 植物固磷量	0-0.1	g P/g DO								☆☆
Pbact	磷过程: 细菌固磷量	0-0.1	g P/g DO								☆☆
hsphos	磷过程: 固磷作用半饱和和浓度	0-2	mg/l								★
ksn	叶绿素 a 过程: 氮半饱和和浓度对藻类与植物光合作用的限制系数	0-1									
ksp	叶绿素 a 过程: 磷半饱和和浓度对藻类与植物光合作用的限制系数	0-1					★★	★★			★
k10	叶绿素 a 过程: 叶绿素 a 与碳的比例	0.01-0.04	mg CHL/mg C								
k11	叶绿素 a 过程: 初级产物中的碳氧比	0.2-0.4	mg C/ mg O								
k8	叶绿素 a 过程: 叶绿素 a 的死亡速率	0-0.1	(/d)					☆			
k9	叶绿素 a 过程: 叶绿素 a 的沉降速率	0-2	m/day					☆☆			
KcoliF	大肠杆菌过程: 粪大肠杆菌一级衰减速率	0-10	(/d)								☆☆
KcoliT	大肠杆菌过程: 总大肠杆菌一级衰减速率	0-10	(/d)								☆☆
tetaT	大肠杆菌过程: 大肠杆菌衰减速率温度系数	1-1.2	无单位								★
tetaS	大肠杆菌过程: 大肠杆菌衰减速率与营养盐的相关系数	1-1.2	无单位								
tetaI	大肠杆菌过程: 大肠杆菌衰减速率与光照的相关系数	1-20	无单位								
rio	大肠杆菌过程: 正午最大日照强度	0-2	kW/m <sup>2</sup>								☆☆

注: ΔS= (状态变量取值下限时模型运行结果-状态变量取值上限时模型运行结果) ÷ 状态变量取值上限时模型运行结果; ★表示正影响, ☆表示负影响, ★/☆数量越多影响程度越高。  
 ΔS≥10, ★★★★★; ΔS≤-10, ☆☆☆☆☆;  
 5≤ΔS<10, ★★★★; -10≤ΔS<-5, ☆☆☆☆;

$1 \leq \Delta S < 5,$	★★★:	$-5 \leq \Delta S < -1,$	★★★:
$0.5 \leq \Delta S < 1,$	★★:	$-1 \leq \Delta S < -0.5,$	★★:
$0.25 \leq \Delta S < 0.5,$	★:	$-0.5 \leq \Delta S < -0.25,$	★:
$-0.25 \leq \Delta S < 0.25,$	无		