

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.008

公明水库与清林径水库连通工程的水环境效应 及长期演变规律

黄河¹,张霞¹,冯韬¹,吴穹²,闫兴成¹,叶宝民³,乔如霞¹,陈求稳¹

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究所; 2. 深圳市原水有限公司; 3. 深圳市东部水源管理中心)

摘要:以珠江三角洲水资源配置工程中的公明水库-清林径水库连通工程为研究对象,基于实测水质与气象数据,结合未来气候模式数据,采用 GOTM 水库水动力学模型与 GOTM-FABM-WET 水库生态动力学模型,构建了公明水库与清林径水库连通工程水动力-水质-生态耦合模型,模拟了不同调度方式下连通工程的水动力特征与水质响应规律,并预测了 2022—2031 年 SSP1-2.6 与 SSP3-7.0 两种气候变化情景下水库的富营养化演变趋势。结果表明:连通后,受水水库清林径总氮质量浓度呈现 1—7 月上升、8—12 月下降的季节性反转特征,而公明水库总氮质量浓度略有下降,叶绿素 a 与总磷质量浓度变化相对较小。在气候变暖背景下,连通工程运行 10 a 后两水库叶绿素 a 质量浓度预计将达到 30~40 $\mu\text{g/L}$,富营养化指数(TLI)进入轻度富营养化区间(50~60),且高排放情景下公明水库总氮质量浓度存在超过Ⅲ类水质标准限值的风险。

关键词:水库连通;气候变化;生态动力学模型;富营养化情势预测;公明水库;清林径水库

Water environmental effects and long-term evolution of the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir connection project

Huang He¹, Zhang Xia¹, Feng Tao¹, Wu Qiong², Yan Xingcheng¹, Ye Baomin³, Qiao Ruxia¹, Chen Qiuwen¹

(1. Eco-Environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute;

2. Shenzhen Raw Water Co., Ltd.; 3. Shenzhen Eastern Water Source Management Center)

Abstract: For the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir connection project in the Pearl River Delta water resources allocation project, a hydrodynamic-water quality-ecological coupled model for this connection project was established based on measured water quality and meteorological data, as well as future climate model data, by using the GOTM reservoir hydrodynamic model and the GOTM-FABM-WET reservoir ecological dynamics model. The hydrodynamic characteristics and water quality response laws of the connection project under different operation modes were simulated, and the eutrophication evolution trends of the reservoirs from 2022 to 2031 under two climate change scenarios (SSP1-2.6 and SSP3-7.0) were predicted. The results indicate that after connection, the total nitrogen mass concentration in the receiving Qinglinjing Reservoir shows a seasonal reversal characteristic of increasing from January to July and decreasing from July to December. Meanwhile, the total nitrogen mass concentration in Gongming Reservoir decreases slightly, and the changes in chlorophyll a and total phosphorus mass concentrations are relatively small. Under the background of climate warming, the chlorophyll a mass concentration in both reservoirs is expected to reach 30-40 $\mu\text{g/L}$ after 10 years of the connection project operation, and the trophic level index (TLI) enters the mild eutrophication range (50-60). Moreover, under the high-emission scenario, the total nitrogen mass concentration in Gongming Reservoir faces the risk of exceeding the limit of the Class III water quality standard.

Key words: reservoir connection; climate change; ecological dynamics model; eutrophication trend prediction; Gongming Reservoir; Qinglinjing Reservoir

随着全球气候变化与城市化进程加速,水资源时空分布不均、水环境污染及供水安全保障已成为制约区域可持续发展的核心问题^[1-2]。河湖水系连通工程作为优化水资源配置、提升水环境承载能力的重要手段,在缓解区域性水资源短缺、增强水系统韧性方面发挥了关键作用^[3]。以深圳市为例,作为典型的高密度超大城市,其本地水资源禀赋匮乏,80%以上供水依赖东江引水,单一水源结构使城市面临供水安全风险^[4-5]。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3205902);国家自然科学基金项目(52121006,52209094)

作者简介:黄河(2001—),男,硕士研究生,主要从事水环境数值模拟研究。E-mail:1352951339@qq.com

通信作者:陈求稳(1974—),男,研究员,博士,主要从事生态水力学和环境水信息学研究。E-mail:qwchen@nhri.cn

水库连通工程在长期运行中,受水区水质波动可能引发富营养化等生态风险,威胁供水安全,如跨流域调水可能导致营养盐迁移与累积,进而引发藻类水华和富营养化^[6-7]。因此,科学评估水库连通工程的水环境效应的响应机制至关重要。王喜华等^[8]指出,氮滞留作为流域氮循环的核心调控机制,其时空动态深刻影响水环境安全与生态健康。Liu 等^[9]在查干湖的研究中指出灌区退水是氮磷输入的重要来源,不当的水量调度可能加剧富营养化风险。在气候变化背景下,水温升高与极端水文事件频发可能进一步放大这些生态风险,如气温升高可能导致水体温度升高,加速有机物的分解,降低溶解氧质量浓度,并促进藻类繁殖^[10]。研究水库连通的水环境效应及其对气候变化的响应机制,对保障饮用水安全与生态可持续性具有迫切现实意义。

近年来,面向连通工程水环境效应评估的模拟工具与评价方法协同发展。在生态效应表征方面,基于浮游植物群落的多指标评价指数通过整合功能参数与生物量指标,为识别富营养化与藻类风险提供了新的评估范式^[11],但在与水动力过程的动态耦合方面仍存在不足。现有生物评价指数多数侧重于物理-化学过程,对浮游植物动态、底泥-水体交换等生态过程的耦合模拟较为薄弱,限制了藻类水华等非线性过程的预测精度^[12]。在气候变化响应方面,Savino 等^[13]通过耦合气候与水文模型,指出传统评估方法可能低估极端气候下水库分层对藻类生长的促进作用;Ma 等^[14]基于机器学习预测了全球湖泊藻华对气候与土地利用变化的响应,强调了升温与营养盐输入的协同效应。然而,现有研究多基于历史气象数据,对水库长期运行条件下气候变化对受水区水质和藻类的影响考虑不足^[15-16]。此外,水库连通后的长期生态风险量化,面临短期监测数据与长期生态过程不匹配的挑战,尤其在营养盐累积、沉积物再悬浮等慢变量效应及多情景风险阈值界定方面存在显著不足^[17]。

本文针对珠江三角洲水资源配置工程中的公明水库与清林径水库连通工程,构建水动力-生态耦合模型,动态耦合水动力、浮游植物、底泥-水体交换等过程,以提升藻类水华和营养盐迁移的模拟精度,最终揭示水库营养盐对水库连通工程运行的长期响应规律,量化未来不同气候情景下的水库富营养化风险,为跨区域水系连通工程的水质风险管理与调度优化提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

公明水库与清林径水库连通工程(图 1)是珠江三角洲水资源配置工程在深圳境内配套项目之一,输水干线全长 41.28 km,为 I 等大(1)型工程,是深圳市骨干水网的重要组成部分^[18]。工程全线位于深圳市光明区、龙华区和龙岗区,建成后将深圳市西北部的公明水库(库容 1.38 亿 m³)与东北部的清林径水库(库容 1.86 亿 m³)连通,实现西江水与东江水的水源互通。公明水库-清林径水库连通工程可实现东江和西江水资源联合调配,提升水资源调配能力,从而保障深圳市供水战略储备目标的实现,增强深圳市水安全保障能力,并为向香港应急供水创造条件。工程正常输水规模为 185 万 m³/d,东江应急工况下的供水规模为 347 万 m³/d,西江应急工况下的供水规模为 200 万 m³/d^[5]。两水库形态复杂,岸线曲折(岸线系数分别为 2.0 和 5.8),有很多库湾和分支,存在局部水动力不足、水体交换能力弱等问题,以及水质恶化甚至富营养化的潜在风险。采用水动力-生态动力学模型预测连通后水库水质变化及长期气候响应,可以为连通工程运行管理提供科学依据。

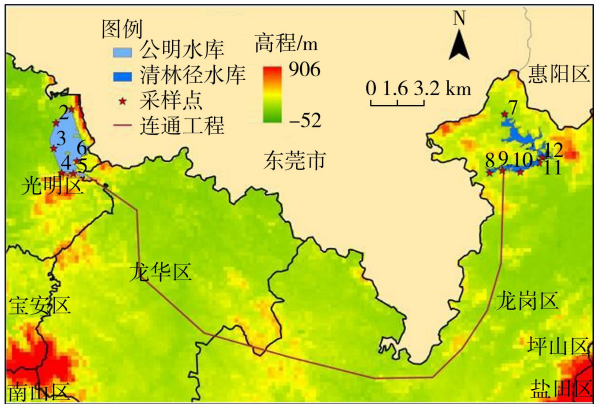


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig.1 Overview of research area and distribution of sampling points

1.2 数据来源及处理

1.2.1 实测数据

结合现有水文水质站分布,在公明水库和清林径水库各布设 6 个采样点(图 1),且在每个水库取水口处设有 1 个采样点,实测数据主要包括用作构建和验证水库生态动力学模型的 2021—2022 年流量、水质与气象等数据。水质监测数据每月月初采样获得,主要包括水下 0.5 m 处的总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-

a)的质量浓度和水温等。本文采用的气象数据主要包括 2021—2022 年的气温、风速、降水、2 m 露点温度、大气压强、太阳辐射及云覆盖系数等数据。2 m 露点温度、大气压强、太阳辐射、云覆盖系数的逐小时数据下载自欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集(ERA5-Land),分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 。

1.2.2 未来气候模式气候数据获取与降尺度

本文未来气候模式气候数据采用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP 6)中 ISMIP3b 项目提供的气候模式的输出数据^[19]。该数据包括了共享社会经济路径(SSPs)下经过降尺度处理的降水、气压、温度、光辐射和风速等变量的气候强迫数据,数据分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,这些数据已广泛用于评估未来气候变化下水文过程的变化分析研究^[20]。本文采用 Delta 方法对气候模式数据进行降尺度和偏差修正。

在 CMIP6 中,共享社会经济路径(SSPs)是一系列基于不同假设的未来发展路径,这些路径考虑了经济、社会、技术、政策和环境等因素的影响。SSPs 路径用于评估未来温室气体排放和相关气候变化的潜在影响,本文主要采用 SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 两种未来气候路径:①SSP1-2.6 是一个以可持续发展为导向的路径,它假设全球将采取积极措施来减少温室气体排放,实现较低的温室气体排放水平(2.6 W/m^2 的辐射强迫)。在这个路径下,技术创新和社会、经济结构的转型将促进绿色增长;②SSP3-7.0 为中等排放路径,假设未来社会发展延续历史趋势,全球合作水平较低,但未出现长期冲突或社会失稳,该情景下温室气体辐射强迫为 7.0 W/m^2 ,排放水平介于积极减排与高排放之间。

2 研究方法

2.1 水库水动力学模型

本文使用 GOTM(general ocean turbulence model)一维水动力模型对不同调水工况下的水库水动力特征进行模拟。GOTM 是一个一维湍流模型,专为研究自然湖库水体中的关键水动力及热力学过程而设计^[21-22]。综合考虑模型适用性、现有资料情况,采用该模型构建公明-清林径水库连通工程一维水动力模型。该模型可计算水体温度、盐度、水位、太阳辐射、外部压力梯度及湍流混合等物理过程,为后续生态模型提供必要的动力驱动。

模型垂向设置均匀分布的 100 层,每日输出一个数据,密度由温盐的状态方程计算而来。在后续典型工况下的公明水库-清林径水库连通工程水质变化研究中,模型水深设置根据工程预计调度情况采用了两种不同的连通运行工况:①公明水库向清林径水库供水时,公明水库水深 54 m,出库流量 $21.21\text{ m}^3/\text{s}$,清林径水库水深 57 m,入库流量 $16\text{ m}^3/\text{s}$,先计算出库流量 $21.21\text{ m}^3/\text{s}$ 时公明水库取水口表层水质浓度,并作为清林径水库边界条件;②清林径水库向公明水库供水时,公明水库水深 31 m,入库流量 $7.65\text{ m}^3/\text{s}$,清林径水库水深 57 m,出库流量 $12.86\text{ m}^3/\text{s}$,先计算该库流量下清林径水库取水口表层水质浓度,并作为公明水库边界条件。

2.2 水库生态动力学模型

水库生态动力学模型采用 GOTM-FABM-WET 模型,该模型由 GOTM、FABM(frame work for aquatic biogeochemical models)和 WET 模型耦合而成。FABM 是基于 Fortran 2003 编写的耦合水动力和生态模型的应用程序编程接口,允许将生物地球化学模型耦合到一维、二维或三维的各种流体动力学模型,而无需更改任何模型代码,并鼓励和支持生态系统模型的模块化,这使得模型耦合更加便利^[23]。WET 模型是由奥胡斯大学湖泊生态组开发的湖泊生态模型,该模型以湖泊富营养化和生态修复过程的二维稳态转化理论为基础,在前身 PCLake 的基础上^[24]进行结构重组,通过 FABM 平台与不同的水动力模型结合^[25]。

GOTM-FABM-WET 模型采用的 10 m 风速、2 m 气温、气压、云覆盖、短波辐射等气象数据来自 ERA5-land 再分析数据库。模型计算时间段为 2021 年 1 月 1 日至 2022 年 5 月 31 日。入库水质边界值采用 2021—2022 每月的水质监测数据。

计算条件设置:生态模块计算时间步长为内膜时间步长,即 10 s。水动力模块与生态模块采用动态实时耦合的方式连接交换数据。

对模拟结果采用平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分比误差(MAPE)、均方误差(MSE)和均方根误差(RMSE)进行评价。

3 结果与分析

3.1 模型验证

根据 2021 年 1 月至 2022 年 5 月的历史实测水质、水文及 ERA5-Land 气象数据分别对公明水库 5 号采样点和清林径水库 9 号采样点连通前水质进行模拟,采用公明水库取水口水质作为公明水库输入边界、清林径水库取水口水质作为清林径水库输入边界,并根据同步监测数据确定水位边界。模拟结果如图 2 所示。两水库的模拟值与实测值在季节尺度上呈现一致性,验证了 GOTM-FABM-WET 模型在水动力-生态耦合模拟中的可靠性。

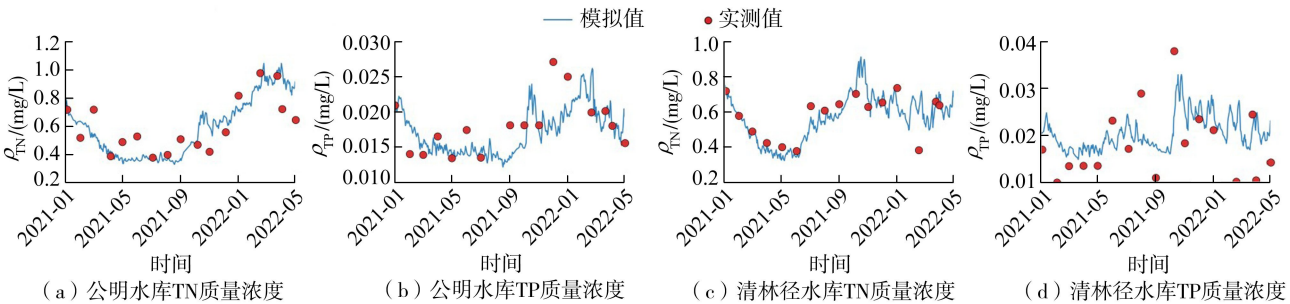


图 2 模型模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured values

由表 1 可见,公明水库 TN 和 TP 的均方根误差(RMSE)分别为 0. 141 mg/L 和 0. 004 mg/L,清林径水库 TN 和 TP 的 RMSE 分别为 0. 072 mg/L 和 0. 005 mg/L。两水库 TP 的 RMSE 均不超过 0. 005 mg/L,表明模型对磷循环的模拟精度较高,这与磷吸附-解吸过程受水动力条件主导的特点相符^[26]。

表 1 模型模拟误差分析

Table 1 Error analysis of model simulation

指标	RMSE/(mg/L)		MSE/(mg/L)		MAE/(mg/L)		MAPE/%	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
公明水库	0. 140	0. 040	0. 020	0. 000 13	0. 116	0. 003	19. 731	14. 777
清林径水库	0. 072	0. 005	0. 005	0. 000 59	0. 049	0. 007	9. 702	25. 345

从绝对误差来看,公明水库 TN 的 MAE 为 0. 116 mg/L,MAPE 为 19. 731%;清林径水库 TN 的 MAE 为 0. 049 mg/L,MAPE 为 9. 702%。两者 MAPE 均低于 30%,说明模型对 TN 质量浓度的相对偏差控制较好。TP 的 MAPE 在公明水库和清林径水库分别为 14. 77%和 25. 34%,略高于 TN,可能与浮游植物对磷的吸收-释放动态及监测数据的高频波动相关^[27]。

3.2 典型工况下水质变化

本文设计了两种典型工况(表 2)进行水库连通后的水质模拟,分别考虑了公明水库向清林径水库调水以及清林径水库向公明水库调水的情况。

表 2 计算工况水力特性参数

Table 2 Calculation parameters of engineering hydraulic characteristics

工况	公明水库水位/m	公明水库取水口流量/(m ³ /s)	清林径水库水位/m	清林径水库取水口流量/(m ³ /s)
公明水库调水清林径水库	54	-21. 21	57	16. 00
清林径水库调水公明水库	31	7. 65	57	-12. 86

如图 3 所示,未调水情景下,两水库 TN 质量浓度存在显著季节性交叉。清林径水库 1—7 月 TN 质量浓度低于公明水库,8—12 月高于公明水库。两水库 TP 质量浓度均较低,差异不显著。TP 年均质量浓度公明水库 0. 020 mg/L,清林径水库 0. 019 mg/L,月度波动范围均在±0. 005 mg/L 内。两水库 Chl-a 质量浓度水平接近,季节性趋势一致。公明水库与清林径水库连通后,在清林径水库向公明水库供水时(图 4),公明水库 TN 质量浓度较未调水前显著下降,调水前公明水库 TN 质量浓度年均值为 0. 626 mg/L,受水后 TN 质量浓度年均值下降为 0. 487 mg/L,降幅约 22. 2%。月度数据显示,各月均呈下降趋势。TP 和 Chl-a 基本维持稳定,水质改善主要体现在氮素控制。

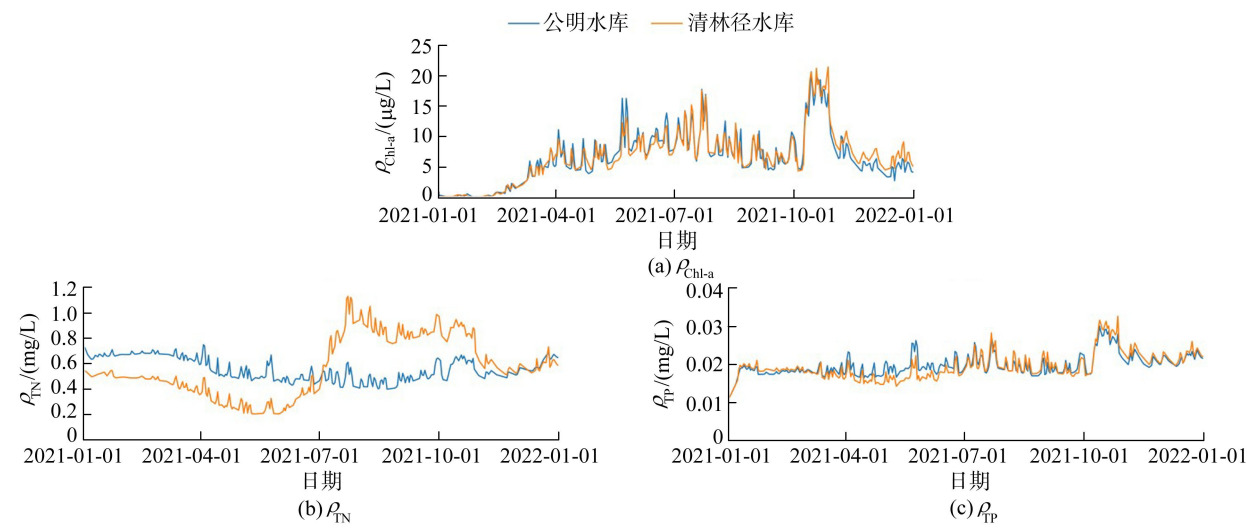


图 3 两水库未调水情景下水质变化
Fig. 3 Water quality changes of two reservoirs under scenario without water transfer

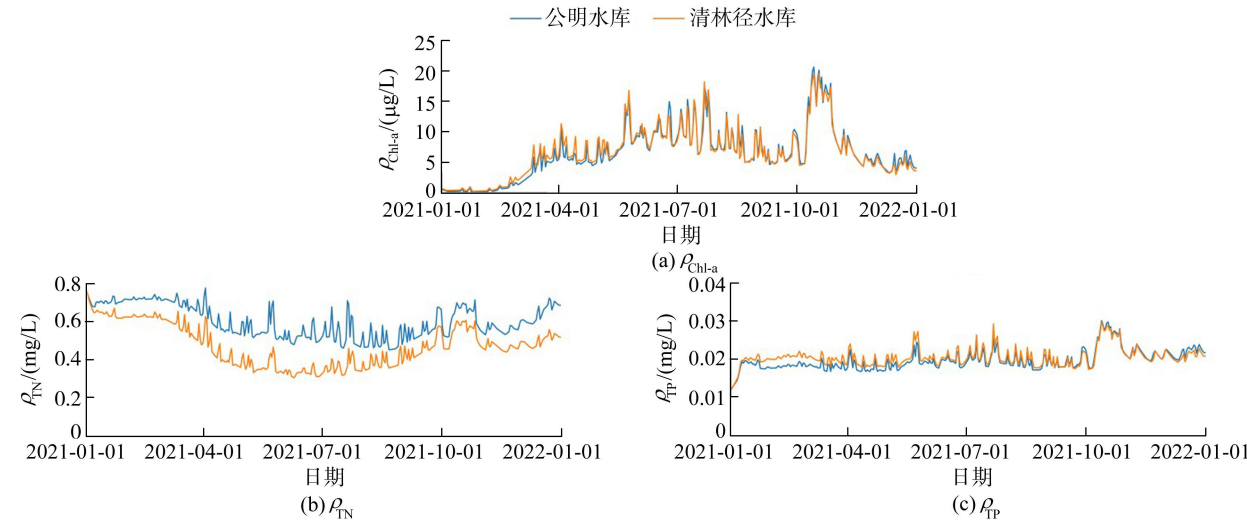


图 4 清林径水库调水公明水库后公明水库水质变化
Fig. 4 Water quality changes of Gongming Reservoir after water transfer from Qinglinjing Reservoir

公明水库与清林径水库连通后,在公明水库向清林径水库供水时(图 5),清林径水库水质呈现“氮素季节反转、磷与藻类波动平缓”的特征。1—7 月 TN 质量浓度较调水前上升 15%~25%,7—12 月则大幅下降。TP 质量浓度调水前后年均值均稳定在 0.018~0.019 mg/L,但因调水流量增加导致水体混合增强,夏季 TP 质量浓度月均波动幅度从±0.002 mg/L 增至±0.005 mg/L。Chl-a 质量浓度调水前后全年平均变化幅度小于 8%,表明藻类生长受氮磷比(25~30)和水温的共同调控,未因为调水出现显著变化。

3.3 连通工程水质长期演变

图 6 和图 7 为 SSP1-2.6(低排放)和 SSP3-7.0(中高排放)路径下,清林径水库及公明水库的水质长期变化情况。

a. TN。公明水库的未来 TN 质量浓度在 SSP3-7.0 情景下呈现显著上升趋势,年均增速为 0.03 mg/L(2022 年为 1.14 mg/L,2031 年为 1.48 mg/L),部分月份(如 2031 年 8 月)超过Ⅲ类限值(1.0 mg/L)。SSP1-2.6 情景下增速较缓,但 2030 年后仍存在超标风险。清林径水库未来 TN 质量浓度受调水影响显著,SSP3-7.0 情景下年均增速为 0.05 mg/L(2022 年 0.60 mg/L,2031 年 1.02 mg/L),峰值集中于夏季(7—9 月),与调水流量增加导致外源污染输入增强有关。

b. TP。两水库 TP 质量浓度均未超过Ⅲ类限值(0.05 mg/L),但 SSP3-7.0 情景下公明水库 TP 质量浓度年均值(0.021 mg/L)高于 SSP1-2.6(0.019 mg/L)。清林径水库 TP 夏季受水动力条件影响更大,因水体

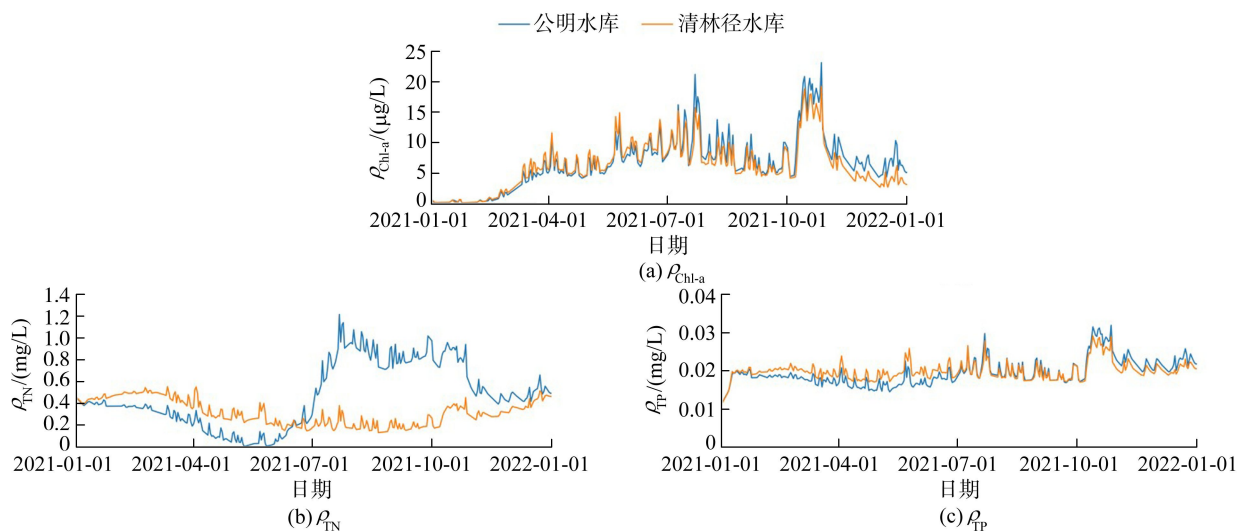


图 5 清林径水库调水公明水库后清林径水库水质变化

Fig. 5 Water quality changes of Qinglinjing Reservoir after water transfer from Gongming Reservoir

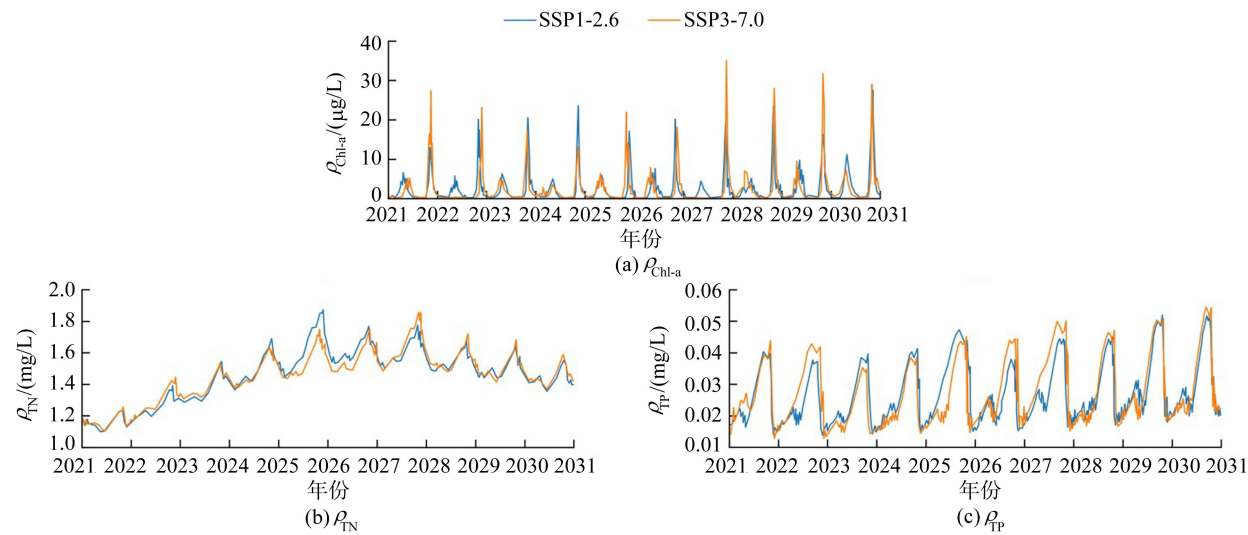


图 6 不同气候情景下两水库连通后公明水库水质变化

Fig. 6 Water quality changes of Gongming Reservoir after connection of two reservoirs under different climate scenarios

混合增强,TP 质量浓度呈现明显夏季升高趋势。

c. Chl-a。两水库 Chl-a 质量浓度在 SSP3-7.0 情景下均呈现显著上升趋势。公明水库 Chl-a 质量浓度峰值从 2022 年的 15.2 $\mu\text{g/L}$ 增至 2031 年的 33.8 $\mu\text{g/L}$,清林径水库从 14.6 $\mu\text{g/L}$ 增至 34.3 $\mu\text{g/L}$ 。Chl-a 质量浓度与水温 ($R^2=0.82$) 及氮磷比 ($R^2=0.67$) 显著正相关,表明气候变暖与营养盐富集共同驱动藻类增殖。

模型预测结果显示,在气候变暖与营养盐输入叠加作用下,公明水库与清林径水库连通后的水质演变呈现显著时空异质性:SSP3-7.0 情景下,公明水库 TN 质量浓度于 2028 年后持续超过Ⅲ类限值 (1.0 mg/L),2031 年峰值达 1.48 mg/L。清林径水库 TN 质量浓度虽未超标,但受调水输入影响,夏季 (7—9 月) 质量浓度波动加剧 (± 0.3 mg/L)。为进一步量化富营养化风险,本文计算了两种气候情景下公明水库与清林径水库的富营养化指数 (TLI)^[28],结果如图 8 所示。两水库 Chl-a 质量浓度在 SSP3-7.0 情景下均呈增长趋势,至 2031 年公明水库年均 Chl-a 质量浓度达 30~40 $\mu\text{g/L}$,富营养化指数进入轻度富营养化区间 (50~60)。Chl-a 质量浓度峰值与夏季高温 ($>28^\circ\text{C}$) 及氮磷比大于 20 的时段高度吻合,表明藻类生长受磷限制减弱,氮素富集成为主导因子。SSP3-7.0 情景下,两水库 TN 和 Chl-a 质量浓度均显著高于 SSP1-2.6,尤其在 2030 年后差异加剧 (TN 质量浓度差距扩大至 0.2~0.3 mg/L,Chl-a 质量浓度差距达 5~10 $\mu\text{g/L}$),凸显出高排放情景下的生态风险。SSP1-2.6 情景下,减排措施有效缓解了 TN 和 Chl-a 质量浓度的上升速率,但至 2031 年公明水库 TN 仍接近Ⅲ类限值,即使低碳路径下仍需强化营养盐管控。

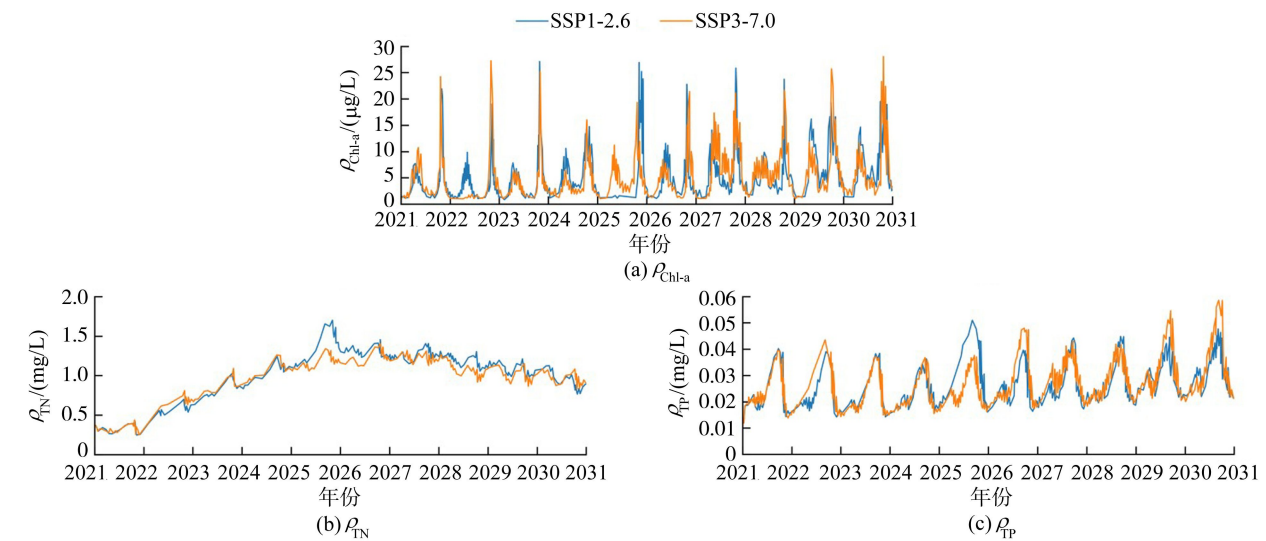


图 7 不同气候情景下两水库连通后清林径水库水质变化

Fig. 7 Water quality changes of Qinglinjing Reservoir after connection of two reservoirs under different climate scenarios

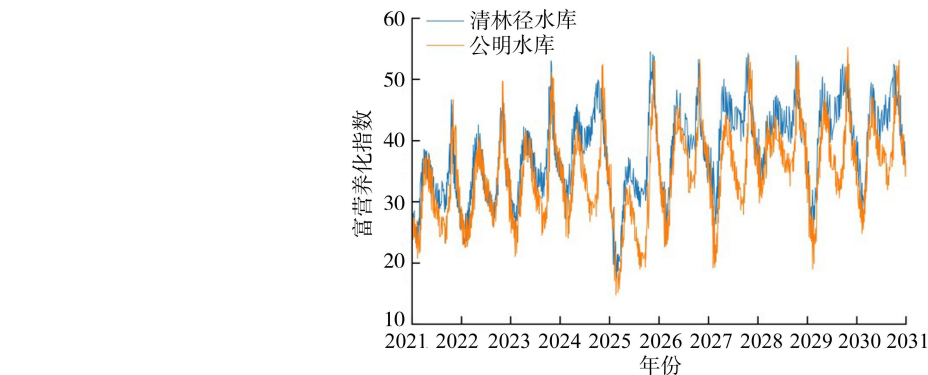


图 8 两水库连通后水库富营养化指数变化

Fig. 8 Changes of trophic level index in reservoirs after their connection

4 讨 论

4.1 气候变化下水库连通工程对受水区水环境的影响

水库连通工程通过增强水体流动性,显著缩短了水体在库区的停留时间。这一变化虽在一定程度上提升了污染物排出的能力,减少了局部污染物累积,但也带来了新的生态风险。本文研究表明,两水库连通后,营养盐(尤其是 TN)的跨水库迁移现象显著,导致受水水库清林径水库在 1—7 月 TN 质量浓度上升,8—12 月下降,呈现出明显的季节性反转。水体停留时间缩短虽增强了污染物迁移和排出的能力,但也促进了藻类和营养盐在系统内的输运与再分布,导致富营养化风险在更广的空间范围内扩散,且持续时间延长。如公明水库调水清林径水库后,TN 质量浓度在冬春季节显著上升,表明外源氮素输入在低流速条件下更易累积;而在夏秋季节,虽因水体交换增强使 TN 质量浓度有所下降,但频繁的水力扰动也可能促进底泥中营养盐的释放,进一步加剧藻类增殖风险。这一结果与 Tan 等^[29]的研究结论一致,即短期调水虽可改善局部水质,但长期运行下营养盐的输入输出失衡可能引发更广泛的富营养化风险。类似地,Zhang 等^[30]在 PFASs 迁移机制研究中发现,溶解相污染物随水流迁移至受水水体后,其生态效应具有明显的延迟性和累积性。因此,水库连通在提升水资源配置能力的同时,也可能成为营养盐和藻类迁移的通道,从而扩大富营养化风险的空间范围并延长其持续时间。

在气候变化背景下,气温持续升高对水库水环境产生了深远影响。本文模拟结果表明,在 SSP3-7.0 情景下,两水库水温显著上升,夏季水温超过 28℃,延长了藻类的生长期。水温升高不仅直接促进藻类代谢和繁殖,还通过加速底泥中有机质的分解和营养盐释放,间接增加了水体中氮、磷等营养盐的浓度。与此同时,

气候变化背景下极端降雨事件频率增加,进一步加剧了外源营养盐的输入。但对于本文研究中的封闭式引调水库而言,其典型特点为集雨面积小、径流量不足,需依赖人为引水来补充蓄水量。这类水库区别于河道型水库,相对于降雨,引调水过程本身成为外源营养盐输入的主要途径之一,调水会显著影响水库的水文情势及营养状态,进而影响藻类生长与水质演变^[31]。本文模型模拟结果表明,至 2031 年公明水库 TN 质量浓度峰值达 1.48 mg/L,超过Ⅲ类水质标准,而 Chl-a 质量浓度持续上升至 30~40 μg/L,富营养化指数进入轻度富营养化区间(50~60)。此外,本文研究还发现 Chl-a 质量浓度与温度($R^2=0.82$)及氮磷比($R^2=0.67$)显著正相关,说明气候变暖与氮素富集共同驱动了藻类增殖,尤其是在磷限制减弱(氮磷比大于 20)的情况下,氮素成为藻类生长的主导因子。长期运行下,水库连通工程与气候变化的叠加效应可能进一步放大水质波动与生态风险。如,在 SSP3-7.0 情景下,公明水库 TN 质量浓度年均增速达 0.03 mg/L,清林径水库 TN 质量浓度年均增速为 0.05 mg/L,均高于 SSP1-2.6 情景,表明高排放路径下气候变暖对营养盐富集和藻类生长的促进作用更为显著。

综上,水库连通工程的规划与运行管理必须在多时空尺度上统筹考虑水量调度与水质响应的协同关系。首先,应高度重视调水过程中营养盐的输入-输出平衡,建立基于实时水质监测的动态调控机制,避免因单一追求水量调配而忽视可能引发的生态反馈。其次,建议制定差异化的季节性调度策略:在藻类高发期(如夏季高温时段),应适度减少从富营养化风险较高水库的调水量,同时通过增加泄流量、优化取水深度等方式增强水体垂向混合,破坏藻类生长所需的稳定分层条件;在非藻华季节,则可适当加大调水规模,利用水力冲刷效应促进污染物输出。此外,还应将多气候路径(如 CMIP6 中的 SSP1-2.6 与 SSP3-7.0)纳入工程长期风险评估与适应性管理框架,通过情景模拟预判不同排放路径下的水质演变趋势,并据此制定针对性的营养盐管控、生态修复与应急调度预案。只有通过多措并举、系统管理,才能在实现水资源优化配置的同时,切实保障供水安全与生态系统的长期可持续性。

4.2 模型局限性与改进方向

尽管 GOTM-FABM-WET 模型较好地模拟了水动力-生态耦合过程,但仍存在局限性,需在未来研究中进一步完善。

a. 模型未充分考虑底泥-水界面的磷交换过程。Lu 等^[32]基于大河口水库的磷吸附动力学试验,建立了磷释放强度与水温、pH 的量化关系($R^2=0.87$),表明长期气候变暖可能加剧底泥释磷风险。本文研究在 SSP3-7.0 情景下观察到公明水库 TP 年均质量浓度(0.0278 mg/L)较 SSP1-2.6 情景(0.0271 mg/L)有所上升,暗示底泥释磷可能成为潜在的长期风险源,而当前模型尚不完整刻画该过程。

b. 所采用的 Delta 降尺度方法在捕捉区域气候异质性方面存在局限。Do 等^[33]通过越南 7 个流域的 CMIP6 降尺度对比研究,指出传统统计降尺度方法对极端降水指标(如 RX1day)的空间分异捕捉能力不足,与实测数据的 RMSE 达 0.34。CMIP6 模式对极端降雨事件的系统性低估,可能进一步影响外源污染负荷的模拟精度。

c. 当前模型在刻画水库水质空间异质性方面尚有不足,尤其是在复杂地形区域和调水口附近,可能存在显著的垂向分层与水平梯度,而现有模型结构难以充分反映这些局部细节。在长期预测方面,本文主要聚焦于气候变化的影响,尚未将人为污染排放(如农业面源与流域景观格局)纳入情景设置^[34-35]。未来可进一步设计多营养负荷情景,并与气候情景进行组合模拟,以科学量化气候与人为驱动因子的相对贡献。

d. 水库进出水口布置、入库河道水文水质条件以及库容形态的空间异质性对局部水动力与水质分布具有重要影响,而本研究在这些工程细节方面的考虑仍较为简单。后续可结合高分辨率地形数据与入库河道实时监测资料,提升模型在关键区域的模拟精度。为提升模型在复杂情景下的预测能力,未来研究可引入三维水动力-水质耦合模型,更精确地模拟营养盐、藻类及溶解氧的空间分布与迁移规律,同时可耦合高分辨率区域气候模式(如 CMIP6-CORDEX)与底泥生物地球化学模块,构建更为系统的水环境模拟框架。

5 结 论

a. 水库连通工程减弱受水水库水质季节异质性。调水方向对水质响应具有显著影响:清林径水库作为受水水库时,受水前 TN 质量浓度呈现冬春低、夏秋高的典型特征,受水后氮素的季节差异性减小(标准差降低 56.8%,变异系数降低 40.3%),公明水库调水有效提升了清林径水库水质的稳定性。公明水库作为受水

水库时,因调水稀释效应,TN 质量浓度年均下降 22.2%。

b. 气候变暖与营养盐输入的协同效应驱动富营养化。SSP3-7.0 情景下,两水库 Chl-a 质量浓度于 2028 年突破 30 $\mu\text{g/L}$,进入轻度富营养化阶段(50~60),且公明水库 TN 质量浓度在 2031 年 8 月达 1.48 mg/L ,超过Ⅲ类限值(1.0 mg/L)。相比之下,SSP1-2.6 情景通过减排措施将 TN 质量浓度增速降低 35%,但至 2031 年仍接近限值(0.98 mg/L),表明单一气候路径难以完全规避水库富营养化风险。

c. 基于模型预测结果,建议实施季节性调水优化策略,夏季增加清林径水库泄流量以增强水体交换,冬季限制外源输入以控制氮素累积。同时,需建立底泥磷释放监测网络,并集成 CMIP6 多模式集合预测,以提升长期风险评估的鲁棒性。

参考文献:

[1] 慕云霄,程玉菲,王军德. 白龙江引水工程受水区水资源利用效率测算与影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):38-46. (Mu Yunxiao, Cheng Yufei, Wang Junde. Measurement and influencing factors for water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(4):38-46. (in Chinese))

[2] 刘秀丽,张标. 我国水资源利用效率和节水潜力[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):5-10. (Liu Xiuli, Zhang Biao. Water use efficiency and water conservation potential in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(3):5-10. (in Chinese))

[3] 李加林,杨佳铭,刘永超,等. 鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析[J]. 水资源保护,2026,42(1):30-38. (Li Jialin, Yang Jiaming, Liu Yongchao, et al. Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection,2026,42(1):30-38. (in Chinese))

[4] 邱国玉,张清涛. 快速城市化过程中深圳的水资源与水环境问题[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):629-633. (Qiu Guoyu, Zhang Qingtao. Issues of water resources and environment in Shenzhen with rapid urbanization [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(6):629-633. (in Chinese))

[5] 何江华. 公明水库—清林径水库连通工程设计研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(增刊2):170-174. (He Jianghua. Design study for the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir Connecting Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(S2):170-174. (in Chinese))

[6] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):42-49. (Liu Ruiyan, Zhang Jianhua, Liu Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):42-49. (in Chinese))

[7] Mukundan R, Hoang L, Geldar K, et al. Climate change impact on nutrient loading in a water supply watershed [J]. Journal of Hydrology,2020,586: 124868.

[8] 王喜华,贾顺卿,胥毅军,等. 流域尺度氮滞留研究现状、趋势及展望[J]. 水资源保护,2025,41(6):1-11. (Wang Xihua, Jia Shunqing, Xu Yijun, et al. Current status, trends, and prospects in watershed-scale nitrogen retention research [J]. Water Resources Protection,2025,41(6):1-11. (in Chinese))

[9] Liu Xuemei, Zhang Guangxin, Xu Y T, et al. Determining water allocation scheme to attain nutrient management objective for a large lake receiving irrigation discharge [J]. Journal of Hydrology,2021,603:126900.

[10] Weber C J, Weihrauch C. Autogenous eutrophication, anthropogenic eutrophication, and climate change: insights from the Antrift Reservoir (Hesse, Germany) [J]. Soil Systems,2020,4(2): 29.

[11] Meyer A, Prygiel E, Laplace-treiture C. Performance of a multimetric index based on phytoplankton to evaluate the ecological quality of French large rivers: the iphyge index [J]. Ecological Indicators,2024,166: 112303.

[12] Wang Yiibo, Liu Pan, Solomatin D, et al. Integrating the flow regime and water quality effects into a niche-based metacommunity dynamics model for river ecosystems [J]. Journal of Environmental Management,2023,336: 117562.

[13] Savino M, Todaro V, Maranzoni A, et al. Combining hydrological modeling and regional climate projections to assess the climate change impact on the water resources of dam reservoirs [J]. Water,2023,15(24): 4243.

[14] Ma Jing, Duan Hongtao, Chen Cheng, et al. Projected response of algal blooms in global lakes to future climatic and land use changes: machine learning approaches [J]. Water Research,2025,271: 122889.

[15] Cheng Bingfen, Xia Rui, Zhang Yuan, et al. Characterization and causes analysis for algae blooms in large river system [J]. Sustainable Cities and Society,2019,51: 101707.

[16] Zhao Ziyue, Liu Xuemei, Wu Yanfeng, et al. A review on the driving mechanism of the spring algal bloom in lakes using freezing

and thawing processes[J]. *Water*,2024,16(2): 257.

[17] 孟钰,魏剑林,管新建,等. 流域水生态环境补偿研究进展[J]. *水资源保护*,2024,40(6):215-223. (Meng Yu,Wei Jianlin, Guan Xinjian,et al. Research progress in watershed water ecological environment compensation[J]. *Water Resources Protection*, 2024,40(6):215-223. (in Chinese)).

[18] 高健,李爱国,王胜波,等. 公明水库—清林径水库连通工程隐伏岩溶特征及对隧洞工程的影响[J]. *水利水电技术(中英文)*,2024,55(增刊2):184-191. (Gao Jian, Li Aiguo, Wang Shengbo, et al. Concealed karst characteristics of Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir Connection Project and its influence on tunnel engineering[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2024,55(S2):184-191. (in Chinese))

[19] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. *气候变化研究进展*,2019,15(5): 519-525. (Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. *Climate Change Research*,2019,15(5): 519-525. (in Chinese))

[20] 杨旭. 气候和土地利用变化背景下中国西北干旱区产水和水质净化服务评估:以博斯腾湖流域为例[D]. 上海:华东师范大学,2020.

[21] 唐冉. 非破碎海浪和 Langmuir 环流对海洋上层湍流混合的影响研究[D]. 青岛:自然资源部第一海洋研究所,2023.

[22] 朱鹏航. 基于 PCLake 模型的乌梁素海水质突变及阈值识别研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2022.

[23] Bruggeman J,Bolding K. A general framework for aquatic biogeochemical models[J]. *Environmental Modelling & Software*,2014, 61: 249-265.

[24] 张笑欣,于瑞宏,张宇瑾,等. 浅水湖泊稳态转换模型 PCLake 研究进展[J]. *水资源保护*,2017,33(3): 19-24. (Zhang Xiaoxin, Yu Ruihong, Zhang Yujin, et al. Progress in research of regime shift model PCLake for shallow lakes [J]. *Water Resources Protection*,2017,33(3): 19-24. (in Chinese))

[25] Schnedler-meyer N A,Andersen T K,Hu F R S,et al. Water ecosystems tool (WET) 1.0-a new generation of flexible aquatic ecosystem model[J]. *Geoscientific Model Development*,2022,15(9): 3861-3878.

[26] Zheng Yazhi,Wang Xiaoling,Li Songmin,et al. Numerical simulation model of water quality evolution in urban rivers considering adsorption-desorption process of nitrogen and phosphorus in sediments[J]. *Journal of Hydrology*,2024,636: 131104.

[27] 杨震,张会强,陈静,等. 不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响[J]. *农业环境科学学报*,2023,42(9):2069-2076. (Yang Zheng,Zhang Huiqiang,Chen Jing,et al. Effects of nitrogen/phosphorus ratios on algae growth in the Beiluo River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2023,42(9):2069-2076. (in Chinese))

[28] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*,2002(5):47-49. (Wang Mingcui,Liu Xueqin,Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*,2002(5):47-49. (in Chinese))

[29] Tan Lang,Wang Zongzhi,Bai Ying,et al. Short-term responses of nutrients and algal biomass in a eutrophic shallow lake to different scales of water transfer[J]. *Science of the Total Environment*,2023,880: 163321.

[30] Zhang Jingjie,Chen Huiting,Nguyen V T,et al. Characterizing PFASs in aquatic ecosystems with 3D hydrodynamic and water quality models[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*,2024,22:100473.

[31] 黄强,赵梦龙,李瑛. 水库生态调度研究新进展[J]. *水力发电学报*,2017,36(3):1-11. (Huang Qiang,Zhao Menglong,Li Ying. Advancements in studies on reservoir ecological operation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*,2017,36(3):1-11. (in Chinese))

[32] Lu Junping, Ma Tailing, Liu Tingxi, et al. Study on sediment phosphorus release mechanism of the environmental impact in Dahekou Reservoir[J]. *Environmental Science and Technology*,2017,40(7):72-78.

[33] Do H X,Le T H,Le M H,et al. Future changes in hydro-climatic extremes across Vietnam: evidence from a semi-distributed hydrological model forced by downscaled CMIP6 climate data[J]. *Water*,2024,16(5): 674.

[34] 陈启慧,纪璐,李琼芳,等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响[J]. *水资源保护*,2024,40(2):90-99. (Chen Qihui, Ji Lu, Li Qiongfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(2):90-99. (in Chinese))

[35] 刘卓然,金中天,姜佳玉,等. 基于荧光指纹的土门西沟小流域农业面源溯源研究[J]. *水资源保护*,2024,40(5):131-140. (Liu Zhuoran, Jin Zhongtian, Jiang Jiayu, et al. Research on agricultural non-point source traceability of Tumenxigou small watershed based on fluorescence fingerprint[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(5):131-140. (in Chinese))