

水量调度对平原河网能量影响分析

田雪琪^{1,2}, 王华^{1,2}, 曾一川^{1,2}, 陈经纬¹, 李家乐¹

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 平原河网水动力条件相对较差, 水质问题较为突出, 为改善平原河网地区水环境状况, 选取江苏省无锡市滨湖河网 2018 年洪季和枯季 19 个断面水文水质监测数据, 基于 MIKE21 滨湖河网水动力-水质模型及 Python 能量计算模型, 探究能量耗散规律以及能量、水质间的关系, 并确定最佳调水流量区间。结果表明: 滨湖河网水质浓度与河流能量显著负相关; 一定调水流量的增加使得河流总能量随之上升, 能量到达阈值后, 随调水流量的上升, 河流总能量呈降低趋势; 在能量目标层面上优选引调水方案, 能有效协调引调水过程中存在的异质性因素, 确定逐日最佳调水流量区间及河网总能量最佳区间, 提供流量优化调控方案, 保障平原河网水动力与水环境条件。

关键词: 河流能量; 水量调度; 二维河网模型; 最佳调水流量区间; 时空分布; 平原河网

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2024)02-0083-08

Influence of anthropogenic water diversion on river energy in plain river network

TIAN Xueqi^{1,2}, WANG Hua^{1,2}, ZENG Yichuan^{1,2}, CHEN Jingwei¹, LI Jiale¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The poor hydrodynamic conditions in the plain river network have resulted in prominent water quality issues. To improve the water environment in the plain river network area, we selected hydrological and water quality monitoring data of flood and dryseasons of 2018 from 19 cross-sections in the Binhu River network in Wuxi, Jiangsu Province. We employed the MIKE21 Binhu River network hydrodynamic – water quality model and a Python-based energy mathematical model to investigate energy dissipation patterns, the relationship between energy and water quality, and the optimal water diversion flow range. The results showed a significant negative correlation between water quality concentration and river energy. Increasing the water diversion within certain limits led to a rise in total river energy; however, upon reaching a threshold, further increases in water diversion caused a gradual decrease in total river energy. By optimizing the water diversion schemes at the energy target level, we effectively harmonized the diverse factors in the water diversion process. This optimization allowed us to determine the daily optimal water diversion flow range and the optimal total energy range for the river network. These findings provide a basis for optimizing water quantity control to ensure the hydrodynamic and water environmental conditions of the plain river network.

Key words: river energy; water diversion; two-dimensional river network model; optimal water diversion flow range; temporal and spatial distribution; plain river network

1 研究背景

河网是城市的重要组成部分, 其重要性体现在灌溉农田、提供水源、改善区域生态环境等多个方面^[1]。调水引流工程是改善河网水环境质量的有

效措施之一, 能够通过增加河流流量、提升河网流速等方式实现城市水系连通, 从而进一步增强河流自净力^[2]。河网调水往往会产生巨大的环境效应^[3], 这种效应具有双重影响: 一方面, 调水可以解决缺水地区的用水需求, 调节各个地区的用水量, 优化其水

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179064)

作者简介: 田雪琪(2000—), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事水环境保护、水环境数值模拟研究。

通讯作者: 王华(1983—), 男, 江苏姜堰人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制、水环境保护、水环境数值模拟研究。

动力条件,促进流域经济和社会的发展^[4-5];另一方面,调水会造成河网颗粒物扰动,使污染物重新分配,一定程度上会导致河流水质的下降。河流的水动力特征实质上是根据河流能量分布确定的,能量的高低决定着河流的演变^[6]。

目前,有关河网内水资源调配的影响研究通常采用流速、水位、流量、水质及经济效益等因素作为评价指标^[7]。武亚菊等^[8]构建了 MIKE11 一维河网水动力模型,以流速为指标研究闸泵联调方案的引调水效果;何妙妙等^[2]以氨氮浓度为指标,分析了各调度方式下吴中区河道水质的变化趋势;陆苗等^[1]通过河网连通程度、水流分流能力等参数开展太湖流域武澄锡虞区水闸调控下的影响分析。相比一维,二维河网模型基于网格刻画地形特征,能更准确地模拟河流中的复杂流速分布、水位变化与污染物扩散过程。在此基础上,以河流能量为指标能够综合表征水体的物理及水力特性,从而更全面深刻地描绘水体^[9-10]。该指标使用积分代替平均流速,更细致地总结了水体的流动趋势^[11-12],为水体复杂指标的研究和应用提供了技术支持^[13-14]。相对流量、水质等单一指标来说,利用能量指标衡量调水流量对河网的影响更为全面准确。

平原河网因水动力条件相对较差,导致其水质问题较为突出,如何改善平原河网水环境一直是水环境保护的热点问题之一^[15-16]。本文以太湖北部的滨湖区河网为例,选取河流能量作为指标探讨了区域内水量调度对该区域环境要素的影响。基于大量水文、水质监测数据,运用 MIKE21 中水动力模块和传输模块构造了滨湖河网二维水动力-水质模型。利用 Python 对 MIKE21 水动力模块模拟结果值进行处理与水体能量积分计算,探究河网能量与水质参数的关系,研究区域内水量调度对能量的影响,根据不同水动力调控方案的能量变化,分析滨湖河网逐日最佳调水流量区间及河网总能量最佳区间。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况与样品采集

选择江苏省无锡市滨湖区蠡湖新城区内滨湖区河网(31°31'24"~31°32'33"N,120°16'17"~120°20'26"E)为研究区域。分别在洪季(2018年8—9月)、枯季(2018年11月)对滨湖河网地区进行水文和水质监测,水文监测参数包括逐日流速值、水位值、流量值,水质监测参数为逐月的氨氮、总磷、总氮和 Chl-a 浓度值。研究区域内共布置监测点位 70 个,其中 68 个

监测点位在无锡市滨湖区,2 个监测点位于滨湖区外。本文主要选取研究区域内 19 个监测点,其点位分布情况详见表 1、图 1。河流流速监测结果按流速大小分为缓流速、平流速、强流速 3 组。无锡市滨湖区研究河流共 70 多条,根据流速监测结果看出,流速小于 0.01 m/s 的河流共有 55 条,约占总河网的 78.57%,大部分河流无明显流动现象,其中梁溪河流速维持在 0.20~0.60 m/s 之间;陆典桥滨流速小于 0.01 m/s;骂蠡港流速在 0~0.10 m/s 之间;曹王泾流速在 0.05~0.45 m/s 之间。基于野外实测数据,通过分光光度法等对原位水样中的氨氮、总磷、总氮和 Chl-a 含量进行测定^[17-18]。

表 1 滨湖河网研究区域内水文水质监测点位断面分布

河流	监测点位	断面名称	经度	纬度
梁溪河	1	大渲桥	120°13'58.77"	31°32'47.76"
	2	梁湖大桥	120°14'00.86"	31°32'53.37"
	3	鸿桥	120°15'00.82"	31°33'07.07"
	4	隐秀桥	120°15'22.85"	31°33'16.10"
	5	青祁桥	120°16'11.44"	31°33'16.93"
	6	蠡桥	120°17'03.40"	31°33'05.11"
	7	梁韵大桥	120°17'22.72"	31°33'27.91"
	8	仙蠡桥	120°17'22.07"	31°33'34.59"
陆典桥滨	9	饶秀桥	120°14'41.22"	31°32'09.93"
	10	闻歌桥	120°15'04.43"	31°32'00.46"
	11	涵翠桥	120°15'48.25"	31°32'00.03"
骂蠡港	12	马蠡港桥	120°17'12.94"	31°32'29.34"
	13	翠园新村	120°17'16.82"	31°32'07.34"
	14	南桥	120°17'22.20"	31°31'47.99"
	15	玉宇桥	120°17'29.91"	31°31'18.05"
曹王泾	16	金石桥	120°17'40.81"	31°31'03.84"
	17	东绛桥	120°18'15.93"	31°30'48.48"
	18	梁南桥	120°19'19.07"	31°30'49.91"
	19	泓溪桥	120°20'14.53"	31°31'42.20"

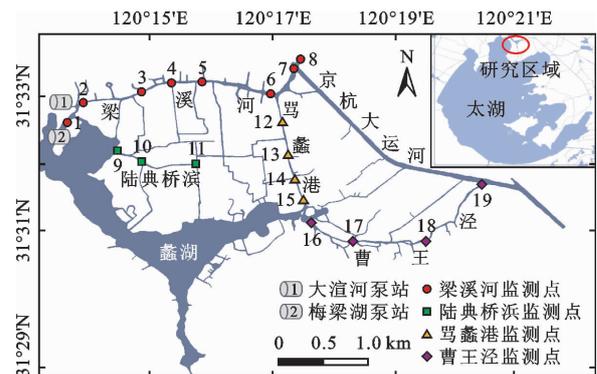


图 1 滨湖河网研究区域监测点位分布

2.2 河网耦合模型的构建

MIKE21 是一个由丹麦水力研究所开发的专业工程软件包,包含水动力与水质模块,从二维纬度模拟河流、湖泊等多重水体水动力趋势、浓度扩散过程与水环境特征^[19-20],本文利用该模型模拟滨湖河网的水位流速变化趋势与氨氮、总磷、总氮、Chl - a 浓度分布特征。

MIKE21 模型是基于河网河道连通现状、实际输水调蓄能力进行搭建的。该模型共设置 66 条河道,总长 62.11 km,包含 49 个边界和 11 座水工建筑物,计算水位点、流量点共计 546 个。入流边界 48 个,位于梁溪河上游及蠡湖沿岸,出流边界 1 个,位于京杭运河。河网水动力模块中出、入流边界点参数条件的设置分别需要水位、流量数据;入流边界点使用监测到的逐日平均流量创建边界条件,出流边界点使用逐日平均水位创建边界条件。传输模块中出、入流边界点参数条件设置需要实测水质数据,均采用月均实测水质^[21]。水工建筑物包含 2 座引水泵站和 9 座辅助泵站,引水泵站分别为梅梁泵站和大渲河泵站,两泵站采取交替互补运行的方式,皆由太湖梅梁湾引水,在梁溪河水闸处汇合进入滨湖河网;9 座辅助泵站主要用于支流水动力条件的改善和防洪排涝。为提升模型流动模拟与数值求解的准确性,滨湖河网二维模型采用非结构三角形网格,共划分三角网格 13 324 个,具体划分细节如图 2 所示。

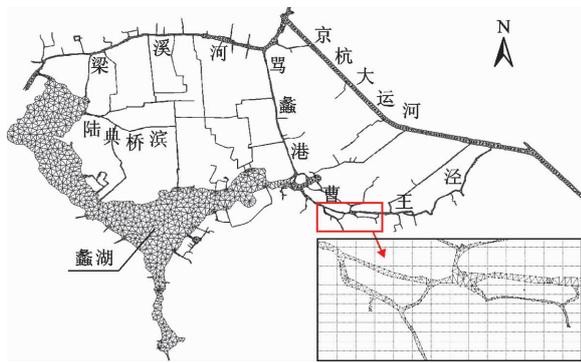


图 2 滨湖河网二维模型三角网格划分图

2.3 能量计算与等级划分

将滨湖河网水域中单位体积水体的总能量分解为三部分,包括重力势能、压力势能和动能^[22]。在计算河网内水域的整体能量时,采用高斯型数值积分法计算二维函数在水体定义域上的数值积分,再根据 MIKE21 模拟所得的水文时间序列数据,利用 Python 对水体能量值进行积分计算,高斯型数值积分详见公式(1)~(4)。

$$\iint_k F(x,y) dx dy \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j F(P(\epsilon_i, \epsilon_j), Q(\epsilon_i, \epsilon_j)) | \beta(\epsilon_i, \epsilon_j) | \quad (1)$$

$$P_n = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n] \quad (2)$$

$$w_i = \frac{2}{(1 - x_i^2) [P'_n(x_i)]^2} \quad (3)$$

$$w_j = \frac{2}{(1 - x_j^2) [P'_n(x_j)]^2} \quad (4)$$

式中: k 为积分域; n 为离散点的数目; x 和 y 为二维空间中的坐标变量; w_i, w_j 表示高斯型数值积分法中用于计算积分的权重,这个权重与积分点 (x_i, x_j) 和多项式 $P'_n(x_i), P'_n(x_j)$ 相关; $F(P(\epsilon_i, \epsilon_j), Q(\epsilon_i, \epsilon_j))$ 为被积函数 F 在点 $(P(\epsilon_i, \epsilon_j), Q(\epsilon_i, \epsilon_j))$ 处的值, $P(\epsilon_i, \epsilon_j)$ 和 $Q(\epsilon_i, \epsilon_j)$ 为积分域内的样本点; ϵ_i, ϵ_j 为勒让德多项式(2)方程 $P_n = 1$ 的第 i, j 个根,当 $n = 0$ 时, $P_0(x) = 1$; $| \beta(\epsilon_i, \epsilon_j) |$ 为坐标变换的缩放因子,确保积分在不同坐标系之间保持一致。

根据能量最大值、最小值和均值,划分能量量级,划分结果见表 2,共 5 个等级,分别为极低能量、低能量、中能量、高能量和特高能量。

表 2 滨湖河网能量值量级划分

能量值/ 10^3 kJ	能量等级
[0.0,0.5]	极低能量
(0.5,1.0]	低能量
(1.0,2.0]	中等能量
(2.0,10.0]	高等能量
>10.0	特高能量

3 结果与分析

3.1 模型率定与验证

以 2018 年 8 月洪季流速实地监测数据作为水动力模块的率定数据,2018 年 11 月枯季流速实地监测数据作为 MIKE21 水动力模块模型的验证数据。MIKE21 水动力数学模型的主要参数为糙率系数,该参数是一个反映水流阻力的综合系数,其糙率系数的确定通过考虑研究区域河床现状进行率定取值^[23]。率定与验证点位设在 19 个监测点位处(图 1),平均相对误差(mean relative error, MRE) 是预测值与真实值之间差异的平均百分比,根据 MRE 衡量验证模型精度。调节 MIKE21 水动力模块的糙率系数提升模型整体精度。根据实际调整发现模型参

数中河道糙率可按照水面宽度分为两类,最大水面宽度 ≥ 30 m时,糙率取值在0.021~0.025间,最大水面宽度 < 30 m时,糙率在0.030~0.035之间。梁溪河、曹王泾、骂蠡港河宽分别为75、35、30 m,糙率取值为0.025、0.022、0.021;陆典桥滨河宽为12 m,糙率取值为0.032;其余河道河宽在12~17 m之间,糙率取值为0.033。将MIKE21水动力模块模型最终的模拟值和实测值进行对比,如图3所示,模拟过程流速与实测数据基本一致。计算水动力模块模型的MRE,结果表明流速在率定期与验证期的MRE值分别为6.79%和6.45%。当模型流速MRE值小于7%时,视为有效参数,因此,该水动力数学模型能够较为科学地反映无锡市滨湖区河网水动力过程^[24]。通过参数敏感性分析确定水体能量模型的误差度,结果表明,水体能量数学模型误差度在6.87%~7.25%之间,误差较小,证明该模型满足滨

湖河网水体能量计算的精度需求^[25]。

以2018年8月洪季氨氮、TN、TP和Chl-a实地监测数据作为传输模块的率定数据,2018年11月枯季氨氮、TN、TP和Chl-a实地监测数据作为MIKE21传输模块模型的验证数据。通过调试水质参数降解系数与扩散系数对水质模型进行率定^[26-27],模型参数中氨氮、TN、TP的降解系数分别取0.080、0.071、0.101 d^{-1} 时,率定与验证结果见图4,模拟过程水质浓度与实测基本一致。计算传输模块模型的MRE,结果表明氨氮、TN、TP率定期MRE值分别为9.37%、7.89%和5.17%;验证期MRE值分别为9.23%、2.56%和2.79%。扩散系数取默认值0.01 m^2/s 时,Chl-a在率定期、验证期MRE值分别为12.33%、6.07%,结果表明滨湖河网水质模块计算值与实测值的MRE值皆小于20%,满足模拟所需精度要求^[28]。

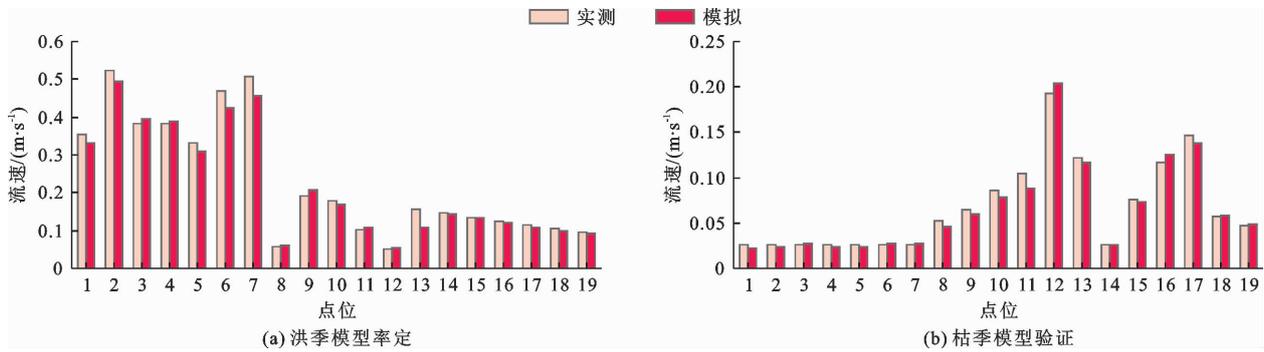


图3 2018年滨湖河网研究区域监测点位水动力模块模型参数率定与验证

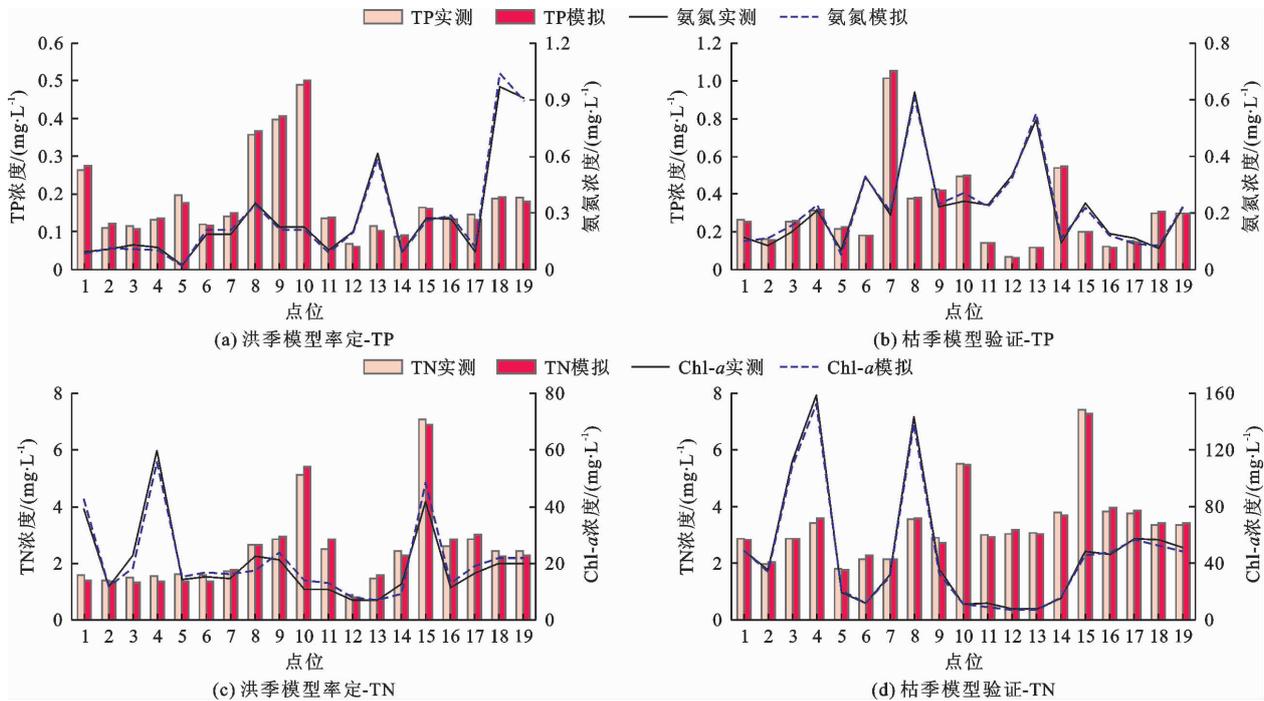


图4 2018年滨湖河网研究区域监测点位传输模块模型参数率定与验证

3.2 河网能量时空演变特征

MIKE21 水动力模拟结果表明,除梁溪河外,河网动能值皆较低,势能值远高于动能值,动能值仅达到势能值的 0.02 ~ 0.40。实地调查结果表明,动能值低与河网闸门和小型抽水站的建造有关,除此之外,滨湖河网受黑臭水体和藻类繁殖影响,多条河流正在进行疏浚工程,也导致了其动能值偏低。调水量的变化对河网动能值有显著影响,枯季其影响更为显著。

基于 MIKE21 水动力模拟的滨湖河网演变结果,依据公式(1)~(4)利用 Python 进行水体的能量积分计算,分析滨湖河网的能量时空变化规律,当调水流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,滨湖河网 4 条主河流总能量见图 5。由于能量随时间尺度增大,且具有消耗性和发散性,滨湖河网的总能量宏观上遵循缩减规律。在湖区等广阔地区能量值较大,在河网区等狭窄地区能量值一般较小。研究滨湖河网在洪季 8 月 2—31 日时间内的总能量变化规律,发现在第 3~4 天,滨湖河网能量达峰值的 1/2,在第 5~6 天达峰值的 1/4,在第 12 天后曲线趋于平稳;研究枯季 10 月 2—31 日时间内的能量变化规律,发现在第 3~4 天,滨湖河网总能量达峰值的 1/2,在第 5~6 天达峰值的 1/4,在第 15 天后曲线趋于平稳,总能量呈现出下降快、趋于稳定慢的

特点;与枯季相比,洪季能量下降更为急剧。

滨湖河网的能量季节性变化明显,从图 5 可以看出,洪季时河网水体能量明显大于枯季,洪季能量介于低能量与特高能量之间,枯季能量介于极低能量与高等能量之间,相差约一个能量量级。洪季各河流能量量级相差 2~3 个能量量级,枯季相差 1~3 个能量量级,洪季与枯季相比呈现出河流间能量差值较大的特点,这是由于在洪季,滨湖河网呈现出相对于枯季显著优越的水动力特征。

滨湖河网内部河流在地理位置影响下其能量值差异较大,梁溪河总能量显著高于其余河流总能量,如图 5 所示,在洪季调水流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时可达能量最高值 $22.70 \times 10^3 \text{ kJ}$,整体处于高-特高能量量级区间,其单位长度河流能量在洪季是骂蠡港、曹王泾、陆典桥滨等 3 条河流的 13.13、9.11、14.57 倍,在枯季分别是它们的 2.86、5.05、2.77 倍。与梁溪河相比,骂蠡港和曹王泾水体能量的消散速度更高,洪、枯季分别第 22~23 天时趋于稳定,呈现出下降快、稳定慢的特点,调水流量对于梁溪河的影响远大于曹王泾和骂蠡港。陆典桥滨河流能量相比最低,洪、枯季能量最高分别为 0.73×10^3 、 $0.53 \times 10^3 \text{ kJ}$,总能量处于极低与低能量量级之间。

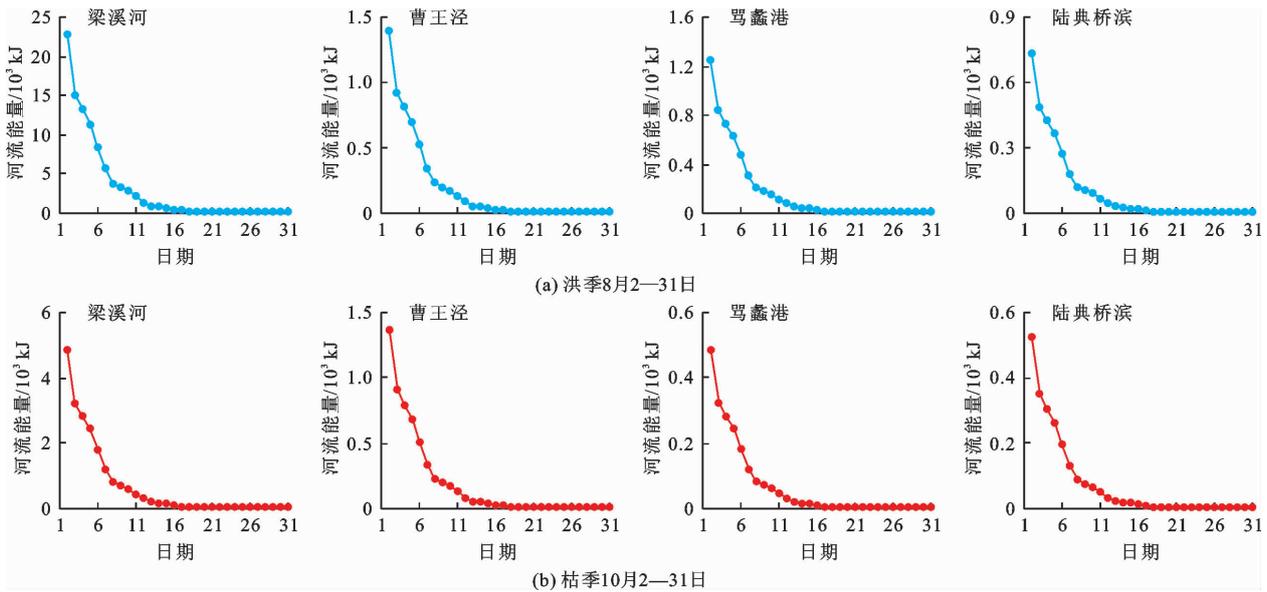


图 5 2018 年滨湖河网 4 条主河流洪、枯季总能量衰减图(调水流量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$)

3.3 水质与能量时空分布

考虑滨湖河网区域内能量、氨氮、TP、TN、Chl - a 的时间分异特征,分析洪、枯季的参数指标值差异特征。洪季流速大、流量高,各点位的能量值明显高于枯季各点位的能量值。在 19 个监测点位中,90% 的点位在枯季时水质参数值高于洪季,然而洪季在曹王

泾的 18、19 点位处,存在氨氮浓度接近 1 mg/L 的极大值,极端值的出现使得洪季氨氮在 4 条河流点位处的平均浓度为 0.27 mg/L ,略高于枯季(0.22 mg/L)。4 条河流点位处 TP、TN、Chl - a 的平均浓度在枯季分别为 0.30 、 3.36 、 47.94 mg/m^3 ,高于洪季 TP、TN、Chl - a 的平均浓度(0.19 、 2.43 、 19.91 mg/m^3)。对比

之下枯季的流量仅占洪季的 0.02, 枯季的能量仅占洪季的 0.15, 枯季各水质指标值约是洪季的 2.27 倍。MIKE21 水动力-水质耦合模型模拟结果表明, 随河流动能的增加, 氨氮、总磷、总氮、Chl-a 指标浓度随之上升, 在单位水体动能达到 60~70 kJ 时, 随河流动能上升, 指标浓度逐渐降低, 此时污染物经历先解吸后吸附的过程。考虑滨湖河网区域内能量、氨氮、TP、TN、Chl-a 的空间分异特征, 区域内能量高低分布表现为: 梁溪河 > 骂蠡港 > 曹王泾 > 陆典桥滨; 区域内水质参数高低分布总体表现为: 骂蠡港 > 陆典桥滨 > 曹王泾 > 梁溪河; 梁溪河水域内总氮、总磷的参数值相对较低, 水质较好。能量的高低差异可能是导致平原河网内部不同水域间水质参数差异的原因, 能量高的水域内, 对应水质参数的值较小, 水质较好; 能量低的水域内, 对应某些水质参数指标的值较大, 水质相对较差。

河流能量在一定程度上体现了河流的水质情况, 对滨湖河网区域内动能 (E_v) 及水质参数的时空分异特征展开讨论, 分析两者之间存在的相关性关系, 其中水质参数选择氨氮、总磷、总氮和 Chl-a 浓度值, 分析结果见图 6。从图 6 可以看出, 滨湖河网河流动能皆与各项水质参数呈负相关关系, 滨湖河网营养物浓度随着动能的增加而降低, 这种关系主要归因于动能较高的河流断面处水流驱使营养物质离开, 从而导致营养盐浓度降低, 动能与氨氮、总磷、总氮和 Chl-a 参数的皮尔逊指数维持在 -0.82 ~ -0.49 之间, 呈强相关性。MATLAB 多元线性拟合研究表明滨湖河网中河流动能与营养盐及 Chl-a 存在多元线性关系, 动能与各水质因子间的多元回归方程如式(5)所示, 该式有较强的拟合性, 拟合系数 R^2 达 0.773 0, 拟合程度较好。

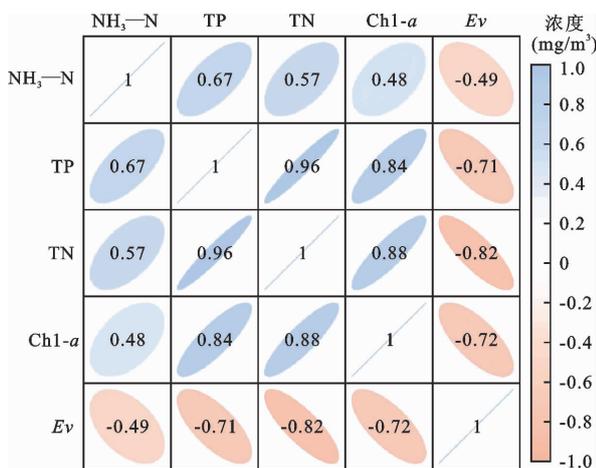


图 6 滨湖河网内动能值 E_v 与水质参数相关性分析

$$Z_{E_v} = -0.1116 - 0.3488Z_{x1} + 2.618Z_{x2} - 2.836Z_{x3} - 0.0887Z_{x4} \quad (5)$$

式中: Z_{E_v} 为 Z-score 标准化处理后的滨湖河网内动能值, 无量纲; Z_{x1} 、 Z_{x2} 、 Z_{x3} 分别为 Z-score 标准化处理后的滨湖河网 TN、TP、氨氮浓度值, 无量纲; Z_{x4} 为 Z-score 标准化处理后的滨湖河网 Chl-a 浓度值, 无量纲。

3.4 河网最佳调水流量区间确定

探讨不同调水流量 Q 对河流总能量 E 的趋势变化, 其趋势预测公式如式(6)所示, 该式预测了滨湖河网总能量在达到峰值后, 随调水流量的进一步增加, 滨湖河网总能量的削减过程, 该公式拟合系数 R^2 达 0.8057, 拟合程度较好。

$$Z_E = 0.0160Z_Q^{-0.395} \quad (6)$$

式中: Z_E 为 Z-score 标准化处理后的滨湖河网河流总能量, 无量纲; Z_Q 为 Z-score 标准化处理后的滨湖河网调水流量, 无量纲。

基于 MIKE21 水动力模型的模拟结果, 对各滨湖河网总能量分布进行计算分析, 图 7 为滨湖河网洪、枯季不同河流总能量随调水流量变化曲线。从图 7 中可以看出, 随河流调水流量的增加, 河流总能量随之上升, 直至调水流量到达 5~10 m³/s 后, 随调水流量的进一步上升, 河流总能量呈下降趋势。在调水流量的变化驱动下, 梁溪河总能量变化最为显著, 总平均变化率达 44.64%, 其能量量级由高等能量上升至特高能量, 后下降至高等能量; 曹王泾、骂蠡港、陆典桥滨总平均变化率为 2.62%、10.97%、13.83%, 其中曹王泾能量在中等能量量级区间波动, 骂蠡港能量在低等能量量级区间波动, 陆典桥滨受引水通量变化的影响相对较小, 其能量波动维持在极低能量与低能量量级区间。由于曹王泾片区洪季水体污染负荷相对较高, 其最佳能量区间也相应较高, 除曹王泾洪季在日均调水流量 20 m³/s 的情况下河流总能量达到峰值外, 曹王泾在枯季、其余 3 条河流在洪、枯季达到最佳能量区间时的日均调水流量维持在 5~10 m³/s 之间, 因此, 滨湖河网逐日最佳调水流量区间为 [5.0, 10.0] m³/s, 梁溪河作为滨湖河网能量最高河流, 在逐日最佳调水流量区间的能量最佳区间为 [4.86 × 10³, 22.70 × 10³] kJ, 滨湖河网总能量最佳区间在 [7.25 × 10³, 26.08 × 10³] kJ。

4 讨论

以中国太湖梅梁湾东部的滨湖河网为例, 针对

梁溪河、曹王泾、骂蠡港、陆典桥滨等4条重点河流分别在洪、枯季进行不同调水工况下的能量时空演变趋势分析,基于能量与水质关系确定滨湖河网逐日最佳调水流量区间。结果表明,河网氨氮、TP、TN、Chl-a的水质改善效果随调水流量变化进而呈现出一定程度的差异,结合唐一率^[29]的研究,调水可以在一定水平上实现水质的改善,但调水过程造

成的物质输移会带来大量悬浮物,因此调水存在着两面性^[30-31]。通过河流能量与水质间的变化关系曲线,以河流能量为基准衡量最佳调水流量区间,有效确定了最优调度方案,即日均调水流量维持在 $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间。下一步,将经济效益考虑在内,致力于在兼顾经济和环境效益的基础上,探寻平原河网最佳的水资源调配方案^[30-32]。

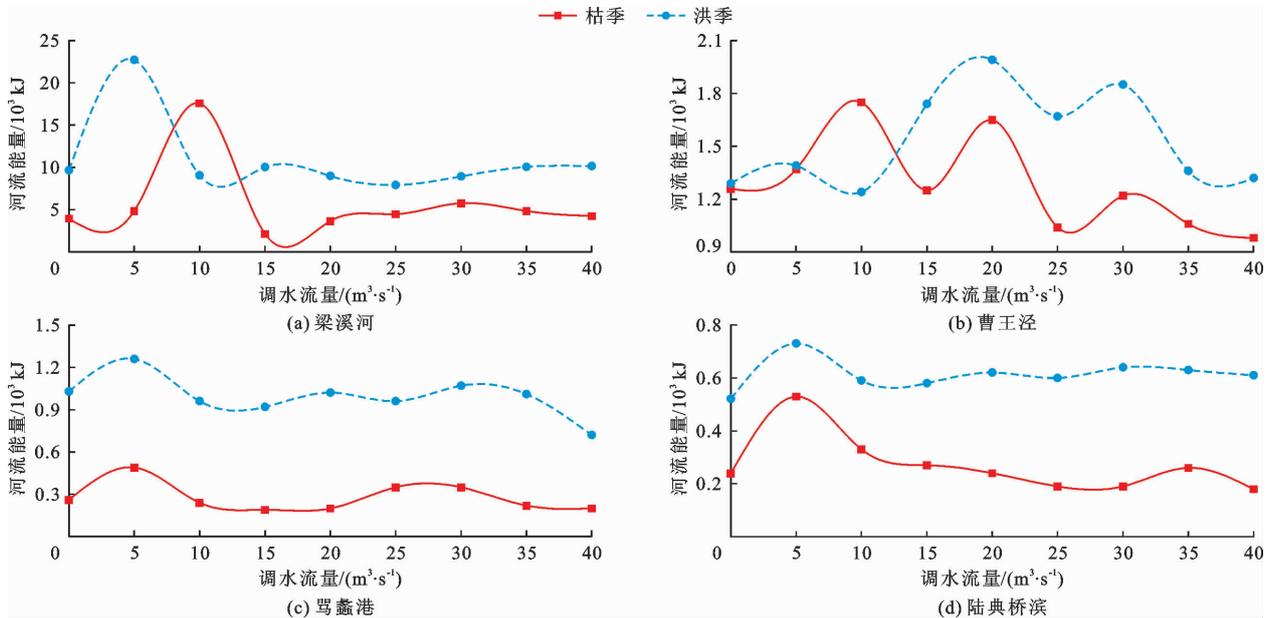


图7 滨湖河网洪、枯季不同河流总能量随调水流量 Q 变化曲线

利用本研究建立的基于能量区间的最佳引调水流量区间体系,能够更为准确地筛选出水质改善目标下的最优水动力调控方案,可在一定程度上为其他平原河网相关工作提供参考,对水环境的持续改善和科学化决策提供重要的理论依据。鉴于城市平原河网的自然因素和社会因素,仅采取引调水改善其水环境仍有局限性,建议控源截污,增强对城市平原河网的整体管控;内源治理,对城市平原河网进行河道清淤,从源头上对水质进行改善^[33-34];生态保护,提高河道的自净能力;活水保质,改善水体生态环境^[35]。通过上述措施,实现平原河网水资源的可持续利用,对优化河网水生态环境有一定的实践意义。

5 结论

本文选取滨湖河网作为研究对象,探究了区域内调水流量对河流能量的影响。采用 MIKE21 建立滨湖河网二维水动力-水质模型,并利用 Python 进行数据处理与单位水体的能量积分计算,分析了水质与能量时空分异特征,确定了滨湖河网逐日最佳调水流量区间及河网总能量最佳区间。

(1) 能量随时间尺度增大具有消耗性和发散性,目标滨湖河网的总能量宏观上遵循衰减规律,洪、枯季,在第3~4天,滨湖河网能量达峰值的1/2,在第5~6天达峰值的1/4,在第12~15天后曲线趋于平稳,与枯季相比,洪季能量下降更为急剧。

(2) 滨湖河网内部河流能量存在空间差异。研究区域内,梁溪河能量显著高于其余河流能量,整体处于高-特高能量量级区间,其单位长度河流能量在洪季达骂蠡港、曹王泾、陆典桥滨的13.13、9.11、14.57倍,在枯季达2.86、5.05、2.77倍。

(3) 滨湖河网河流动能与营养盐浓度、Chl-a 的皮尔逊相关系数在 $-0.82 \sim -0.49$ 间,呈强负相关性,滨湖河网营养物浓度随着动能的增加而降低,这种关系主要归因于动能较高的河流断面处水流驱使营养物质离开,从而导致营养盐浓度降低。

(4) 调水工程对于河流的长久发展具有两面性,随河流调水流量的增加,水动力条件得到优化,但调水过量会造成河网颗粒物扰动,使污染物重新分配,一定程度上导致了河流水质的下降。通过河流能量衡量最佳调水流量区间,调水在一定范围内

的增加促使河流总能量随之上升,直至到达阈值后,随调水流量进一步上升,河流总能量呈下降趋势。研究区域滨湖水网逐日最佳调水流量区间为 $[5, 10] \text{m}^3/\text{s}$,其对应河网总能量最佳区间在 $[7.25 \times 10^3, 26.08 \times 10^3] \text{kJ}$ 。

参考文献:

- [1] 陆苗,许有鹏,高斌,等.平原河网区水利工程调控下水文连通变化[J].地理学报,2021,76(11):2685-2696.
- [2] 何妙妙,司黎晶,王姣.调水引流改善平原河网水质分析及优化调度方案研究[J].水利建设与管理,2022,42(9):70-76.
- [3] 彭卓越,濮杭荣,吴灏.基于 Bayes 和 SWOT 的跨流域调水生态补偿受偿意愿及激励机制研究[J].生态经济,2023,39(2):181-187.
- [4] 龚李莉,蔡梅,王元元,等.新沟河工程应急调水效果评估[J].水资源保护,2023,39(1):166-173.
- [5] 王宗志,谈丽婷,耿敏,等.考虑调水和供水规则的水库优化调度[J].水资源保护,2023,39(1):15-21+48.
- [6] 李彬,孙东坡.非结构网格数值模拟映射的河流能量公式推导及探析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(5):84-90.
- [7] 万晓凌,刘森,刘俊杰,等.江苏省长江引排水及调水特性分析[J].江苏水利,2022(S1):50-55.
- [8] 武亚菊,龙晓飞,吴琼,等.东莞市麻涌镇河网水系引调水效果研究[C]//中国大坝工程学会.水库大坝智慧化建设与高质量发展.贵州:中国建筑工业出版社,2023:886-891.
- [9] 高瑞,穆振侠,彭亮,等.水量平衡与能量平衡模式下的 VIC 模型在喀什河流域的应用研究[J].灌溉排水学报,2018,37(1):106-112.
- [10] LEE J, KIM H. Regional dimensions of the South Korean water - energy nexus[J]. Energy & Environment, 2021, 32(4): 722-736.
- [11] ESCRIVA-BOU A, LUND J R, PULIDO-VELAZQUEZ M. Saving energy from urban water demand management [J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4265-4276.
- [12] HELEREA E, CALIN M D, MUSUROI C. Water energy nexus and energy transition: a review [J]. Energies, 2023, 16(4): 1879.
- [13] LEE J, YOUNOS T. Sustainability strategies at the water-energy nexus: renewable energy and decentralized infrastructure [J]. Journal American Water Works Association, 2018, 110(2): 32-39.
- [14] XIANG Xiaozhi, JIA Shaofeng. China's water - energy nexus: assessment of water-related energy use [J]. Resources Conservation and Recycling, 2019, 144: 32-38.
- [15] 夏玉宝,王华,何新辰,等.太湖流域典型滨湖水网水动力与水质时空异质性[J].湖泊科学,2021,33(4):1100-1111.
- [16] 曾一川,王华,渠昊,等.滨湖水网叶绿素 a 时空分布特征及相关性分析[J].环境工程,2020,38(9):23-30+153.
- [17] 郭宇龙,许海,陈旭清,等.太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应[J].环境科学,2021,42(1):242-250.
- [18] 余茂蕾,洪国喜,许海等.湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J].环境科学,2019,40(2):603-613.
- [19] 徐存东,任子豪,李智睿,等.基于 MIKE21 的南潏区河网水动力水质耦合模拟研究[J].环境科学与技术,2022,45(10):51-59.
- [20] 胡艳海,周林飞.石佛寺水库二维水动力及水质数值模拟与分析[J].人民长江,2021,52(1):31-38.
- [21] 陈虹,王胜安.复杂河道二维水流数学模型与应用[J].福州大学学报(自然科学版),2010,38(4):589-595.
- [22] 王朋.吹填施工中管道水力输送原理分析[J].水运工程,2023(S2):49-52+63.
- [23] 蒋水华,黄中发,黄劲松等.蓄滞洪区洪水演进模拟及堤防溃决损失评估方法[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):131-139+145.
- [24] 常露,柳莹,周敏,等.基于 MIKE 模型的梁溪河水质水量分析与应用[J].江苏水利,2021(2):59-62.
- [25] 魏健,潘兴瑶,孔刚,等.基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):64-69+76.
- [26] 罗倩,任理,彭文启.辽宁太子河流域非点源氮磷负荷模拟分析[J].中国环境科学,2014,34(1):178-186.
- [27] 孙晋雯,逢勇,罗缙,等.北方典型山区河道不同污染条件下水环境预测研究:以秃尾河为例[J].水资源与水工程学报,2014,25(5):147-150.
- [28] 刘志奇,王华,冯翔宇等.基于水质目标的平原河网水力调控阈值研究[J].环境科学与技术,2021,44(5):200-210.
- [29] 唐一率.梁溪河水质改善的调水引流效应研究[D].南京:南京大学,2018.
- [30] 潘泓哲,李一平,唐春燕,等.多目标优化下平原河网引调水改善水环境效果评估[J].湖泊科学,2021,33(4):1138-1152.
- [31] KAI Xiaoli, QIU Xiacong, WANG Yan, et al. The water environment carrying capacity of the Aiyi River based on artificial neural networks [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(1): 131-139.
- [32] 杨朝军,应泽林,陈飞.绍兴平原河网引水工程精确引水方案研究[J].浙江水利水电学院学报,2021,33(4):20-26.
- [33] LI Jingjing, CHEN Yingshu, WANG Zhe. Effect of pollution load reduction on water quality in rural lakes in the shallow hill water network area [J]. Water Supply, 2022, 22(7): 6213-6229.
- [34] 柯贵鹏.城市水生态保护和修复分析:以安庆市水环境治理为例[J].中国资源综合利用,2023,41(1):162-164.
- [35] YUE Qiang, ZHANG Yujie, LI Chunyu, et al. Research of water environment capacity allocation in Liaoning Province based on the analytic network process [J]. Water Resources, 2021, 8(2): 310-323.