

调水新格局下太湖水生态功能提升研究

苏鹏鹏¹, 闫振华^{1*}, 黄 睿^{2*}, 胡晓东²

¹河海大学环境学院, 江苏 南京

²江苏省水利科学研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年12月26日; 录用日期: 2025年1月26日; 发布日期: 2025年2月7日

摘 要

太湖“二引三排”调水新格局是保障湖区水生态安全的重要方式,但其对太湖水生态功能的改善效果如何仍少有报道。以太湖为研究区域,模拟研究了新增新孟河调水在不同情境下对太湖湖区水龄、水质和水生态等水生态功能的影响。结果显示,太湖水龄和叶绿素a (Chl-a)的浓度随调水流量的增加而降低,水龄降低了6.2%~9.0%, Chl-a下降了13.5%~21.5%,调水对两者具有明显的缓解效果。然而,调水流量的增加也引起了湖区总氮总磷的显著增加,现状水质下分别升高了1.2%~9.9%和6.3%~13.8%,但水质优化后,两者分别下降了3.7%~6.2%和6.3%~8.8%。因此,新孟河现状调水需要综合考虑水量和水质因素,入湖水质提升可以有效提升太湖的水生态功能,研究结果可为太湖流域水安全保障提供科学依据和技术支撑。

关键词

太湖, 生态功能, 调水工程, 叶绿素

Aquatic Ecological Function Improvement of Taihu Lake Based on New Water Diversion Scenario

Pengpeng Su¹, Zhenhua Yan^{1*}, Rui Huang^{2*}, Xiaodong Hu²

¹College of Environment, Hohai University, Nanjing Jiangsu

²Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 26th, 2024; accepted: Jan. 26th, 2025; published: Feb. 7th, 2025

Abstract

The new pattern of water diversion in the Taihu Lake, known as “two diversions and three

*通讯作者。

文章引用: 苏鹏鹏, 闫振华, 黄睿, 胡晓东. 调水新格局下太湖水生态功能提升研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(2): 157-166. DOI: 10.12677/aep.2025.152020

drainage”, is an important way to ensure the water ecological safety. However, the effect of the new water diversion on the improvement of the water ecological functions in Taihu Lake is rarely reported. This study simulated the impact of the Ximenghe water diversion on the water age, water quality, and water ecology of the Taihu Lake under different scenarios. The results show that the water age and Chlorophyll a (Chl-a) concentration in the lake decrease as the diversion flow increases, with the water age decreasing by 6.2%~9.0% and Chl-a decreasing by 13.5%~21.5%, showing significant mitigation effects on the water age and Chl-a. However, the increased flow with the current water quality significantly increased the total nitrogen and total phosphorus in the lake, with an increase of 1.2%~9.9% and 6.3%~13.8%, respectively. After optimizing the water quality, the total nitrogen and total phosphorus decreased by 3.7%~6.2% and 6.3%~8.8%, respectively. Therefore, both water quantity and water quality should be comprehensively considered in terms of Ximenghe diversion. The improved water quality of inflow from Ximenghe diversion can effectively enhance the ecological functions of the Taihu Lake. These results could provide scientific basis and technical support for the water security protection of Taihu Lake.

Keywords

Taihu Lake, Ecological Function, Water Diversion, Chlorophyll

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太湖流域地处长三角中心区域,是我国经济最具活力、创新能力最强的区域之一。同时,太湖也是长三角水生态、水环境的集散中心,调配着流域内的水资源供给,支撑着社会经济的高质量发展,战略地位尤为重要。强化太湖流域水环境综合治理与水资源保护,提升太湖水域生态功能,不仅关系到流域内的水资源可持续利用,也关系到长三角一体化高质量发展。但随着经济的快速发展,太湖的富营养化程度不断加剧,蓝藻水华频发,严重危害居民正常的生产生活。随着国家和地方政府对太湖流域水体污染治理的不断加强,太湖的水环境质量有了明显改善,水体水质连续 16 年达标。然而,太湖天然的蝶形形态导致其环境容量十分有限,极易受到人类活动的影响,太湖营养过剩的难题仍未根本性扭转,蓝藻水华的防控形势依然严峻。

引调水工程是缓解区域内水资源短缺,提高水安全保障的重要方式[1],在提升区域水循环,改善湖库水质等方面发挥着关键作用,也是国内富营养化湖泊治理的重要手段之一,在滇池、巢湖、大纵湖等都取得了一定的改善效果[2] [3]。为了缓解太湖水质恶化的趋势,太湖流域管理局于 2002 年开始实施以“引江济太”为核心的一系列引调水工程,以期通过望虞河将长江水引入太湖,实现太湖水环境持续改善的目标。基于此,许多学者对引江济太工程在提升太湖水体水质与改善区域水环境等方面进行了大量研究,发现引江济太调水工程合理调控了太湖水位,加快了河湖水体交换,缩短太湖尤其是贡湖湾换水周期,在一定程度上缓解了太湖蓝藻水华大面积暴发的问题[4] [5]。然而,引江济太工程对太湖水质改善的影响区域主要集中在贡湖区域,其对梅梁湾、竺山湖等受水流流动影响较小的区域水质改善效果需要进一步提升。面向太湖水域生态功能提升的迫切需求,如何优化太湖骨干引排工程的调度,以最大化其综合效益已成为亟待解决的重要问题。

为了进一步改善太湖水质,保障太湖水安全,太湖引江济太的新建工程——新孟河和新沟河工程于 2020 年正式启用实施,太湖流域形成了包括已有望虞河、太浦河工程和新建走马塘、新沟河、新孟河工

程的“二引三排”调水新格局，为改善太湖水环境提供了新的解决方案[6]。然而，调水新格局对太湖水质水生态的改善效果如何仍少有报道。本研究以太湖为研究区域，聚焦于太湖水文水动力、水质、水生态等水域功能的提升需求，通过深入分析太湖流域关键水利工程联合调控对太湖水力停留时间，总氮(TN)、总磷(TP)等重要水质指标和叶绿素 a(Chl-a)等水生态指标的影响，提出优化调度方案，为实现太湖流域水域功能的可持续提升提供科学依据和技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

以太湖湖区为研究区域，其面积约 3192 km²，平均水深 1.9 m。根据《太湖流域水功能区划(2010-2030)》，太湖湖区主要可以划分为东部、西部和南部沿岸区，湖心区和东太湖区，以及北太湖区域的竺山湖、梅梁湖和贡湖等湖区，主要划分湖区如图 1 所示。



Figure 1. Division of the main lake areas of Taihu Lake
图 1. 太湖主要湖区划分

2.2. 数据收集

2.2.1. 历史数据

Table 1. Historical data list
表 1. 历史数据清单

数据类型	历史数据	数据收集范围	数据指标
水文数据	1990 年至今	主要出入湖河道及太湖湖区四个水位监测点(夹浦、小梅口、西山、大浦口)	水位、流量
水质数据	1992 年至今	主要出入湖河道及太湖湖区	29 项基础水质指标监测数据以及 Chl-a 浓度、蓝藻生物量、浮游植物生物量
气象数据	1990 年至今	太湖湖区(以无锡站点为基础)	平均风速、最大风风向、光照强度的日监测数据
遥感反演数据	2005 年至今	太湖湖区	MODIS 叶绿素 a 遥感反演数据

选取太湖流域各站点逐时逐日降雨数据、每日平均气温、每日平均风速、每日最大风速的风向数据、太湖范围站点和上下游入口的每日流量数据、每日水位和每日泥沙量数据、2015~2021 年自动站或者人工监测的水质数据、太湖近年引排水情况、太湖周边支流和对应的流量与水位变化作为模型的基本数据，资料如表 1 所示。

2.2.2. 水平年选择

根据太湖历年引江济太水量及太湖水质，确定本研究水平年和极端年(图 2)。从引水量来看，望虞河引水量中位数为 7.05 亿 m³，其中 2021 年的 7.2 亿 m³ 最接近中位数。从太湖富营养化指数来看，太湖富营养化指数中位数为 61.1，2021、2015、2012 年最为接近中位数。因此，选择 2021 年作为研究的水平年。

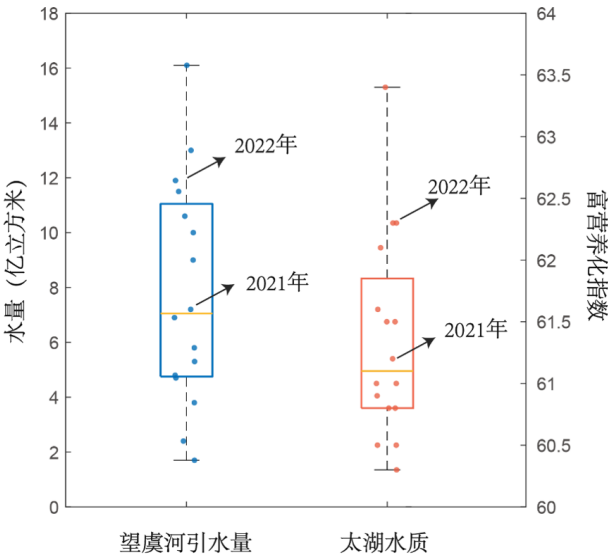


Figure 2. Historical data on water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake and water quality of Taihu Lake
图 2. 引江济太引水量及太湖水质的历年数据

2.2.3. 调水情景设置

根据太湖现在的引调水新格局，设置了以望虞河、新孟河作为引水通道，太浦河、梁溪河、走马塘等其他河道作为出水通道进行设定，本研究模拟的调水情景见表 2。

Table 2. Water diversion simulation scenario settings
表 2. 调水模拟情景设置

序号	引水流量序列(m ³ /s)		序号	新孟河水质调控序列(mg/L)	
	新孟河	望虞河		TP	TN
1	无引水		4-1	0.18	4.36
2	20	75	4-2	0.13	2.4
3	60		4-3	0.10	2.0
4	80		备注：引水量 Q = 80 m ³ /s		

其中，望虞河设置为水平年平均引水流量 75 m³/s，新孟河则分别设置 4 个引水流量梯度，从无引水

至 80 m³/s。根据现场检测结果，望虞河各水质因子均符合入湖河道水质要求，但新孟河水质因子中的 TP 和 TN 超过限制范围。因此，在模拟情景 4 下，新增设置了 3 个新孟河入湖水质梯度，分别为情景 4-1 (水平年浓度)、情景 4-2 (达标浓度)、情景 4-3 (水质较好浓度)。

2.3. 模型构建

本研究选取威廉玛丽大学弗吉尼亚海洋科学研究所开发的三维 EFDC 模型，解析不同调水情境下太湖水龄、水质(TP 和 TN)和水生态(Chl-a)的变化，模型计算范围为整个太湖湖区。基于太湖清淤实测数据并通过网格加载差分湖区底高程(平均高程约-0.53 m)，插值后获得模型网格。通过 EFDC 生成太湖湖区模型计算网格，共划分为 2032 个三角形网格，最小角度为 26°。太湖湖区网格划分如图 3 所示。

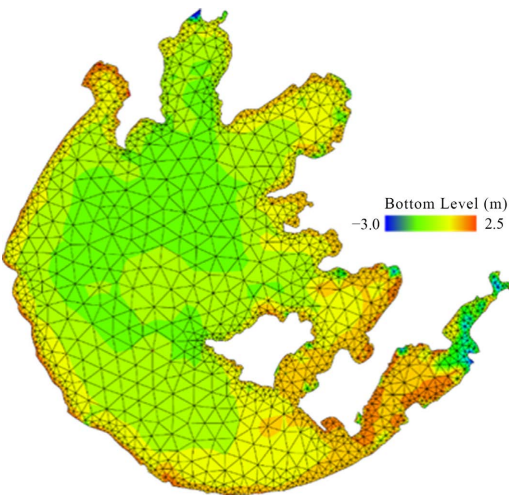


Figure 3. Lake area grid division
图 3. 湖区网格划分

水质生态模型中共含 21 个变量，模拟各变量在水动力条件下的迁移转化、风力风向对水体水动力特征的影响、硝化作用、反硝化作用、泥沙吸附、沉降、有机物水解矿化、复氧作用、藻类生长捕食和死亡、泥水界面释放通量等物理、化学、生物过程。

2.3.1. 模型初始及边界条件设定

太湖边界的出入湖河流信息如表 3 所示，该模型各河道出入湖水量、水质均采用水平年实测数据。

Table 3. Information table of rivers flowing into and out of Taihu Lake
表 3. 太湖出入河流信息表

序号	河流	属性	湖区
1	望虞河	出/入流	贡湖
2	沿湖小闸段	入流	
3	大渲河泵站	出流	梅梁湖
4	梁溪河	出流	
5	五里湖闸站	入流	
6	直湖港闸站	入流	
7	武进港闸站	入流	

续表

8	雅浦桥站	入流	竺山湖
9	太滬运河	入流	
10	殷村港	入流	
11	社渚桥	入流	西沿岸区
12	官渚桥	入流	
13	洪巷港桥	入流	
14	大浦桥	入流	
15	乌溪桥	入流	
16	城东港桥	入流	
17	大港桥站	入流	
18	夹浦港	入流	
19	合溪新港河	出/入流	
20	长兴港河	出/入流	南沿岸区
21	杨家浦港	出/入流	
22	杨家埠站	出/入流	
23	杭长桥站	出/入流	
24	幻溇闸段	出/入流	东太湖
25	团结桥段	出流	
26	太浦闸站	出流	
27	联湖桥段	出流	
28	瓜泾口段	出流	
29	苏东运河	出流	胥湖
30	胥江	出/入流	
31	穹窿桥	出/入流	漫山湖

2.3.2. 模型率定与验证

通过对模型进行灵敏性分析来分析模型参数取值对模型结果的影响。由于水流运动的物理特性已经十分成熟，在 EFDC 模型中，大部分水流运动的物理参数都未作改变，本模型采用 100 s 时间步长保证稳定性。在水位率定过程中，粗糙高度的明显变化对模型运行结果中的水深和流速所造成的影响很小，因此利用《水力计算手册》中的天然湖底糙率表进行率定，模型糙率系数设置为 0.02 m。通过 2021 年太湖多点水位实测数据与模型计算水位值进行率定合理性，水面高程和流速的均方根误差小于 1%，最大平均绝对误差低于 10 cm，总体水平与实测值符合较好。模型 TN、TP、Chl-a 的模拟值与历史数据和现场实测值等多源数据进行比对，平均相对误差均低于 30%，模型模拟的可靠性较好。

3. 太湖水域功能提升效果预测分析

3.1. 太湖水生态现状模拟

结合现场调查数据，太湖水平年的水质水生态模拟结果如图 4 所示。结果显示，整个湖区的 Chl-a 平均浓度为 10.34 μg/L，高浓度区域主要分布在竺山湖(34.56 μg/L)、梅梁湖(18.24 μg/L)、西部沿岸区(25.71 μg/L)、南部沿岸区(21.66 μg/L)。一般而言，水体中的 Chl-a 浓度与水体中的藻类生物量呈现正相关性，

较高的 Chl-a 浓度意味着较大的蓝藻爆发潜能。依照《湖泊营养物基准—中东部湖区(总磷、总氮、叶绿素 a)》的相关规定,我国中东部湖区水体中 Chl-a 的湖泊营养物基准为 3.4 $\mu\text{g/L}$,太湖整个湖区的 Chl-a 水平均高于此值,其中竺山湖的浓度超出基准范围的 9 倍以上。水质方面,全湖湖区的平均 TN 浓度为 0.81 mg/L,高浓度区域主要分布在竺山湖(2.00 mg/L)、梅梁湖(1.24 mg/L)和西部沿岸区(1.35 mg/L)。全湖的平均 TP 浓度为 0.08 mg/L,高浓度区域也主要分布在竺山湖(0.19 mg/L)和西部沿岸区(0.15 mg/L)。按照《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》,太湖湖区的 TN 和 TP 总体上处于 III 类和 IV 类水质标准,竺山湖等严重区域则均为 V 类水质。综合来看,竺山湖、梅梁湖、西部沿岸区的水质和水生态安全较其他湖区更为严峻,这一发现与王亚平等人[4]的研究结果基本一致。竺山湖地处梅梁湾西部,为太湖西北角半封闭型湖湾,水质较差,可能与其作为入湖河道(太滬运河、沙塘港和殷村港)接受区域有关,大量居民日常生活产生的污染物会经太滬运河等进入此区域,造成严重污染[5]。此外,城东港作为太湖最大的入湖段面(42%),其从上游宜兴等区域带来的污染有关。

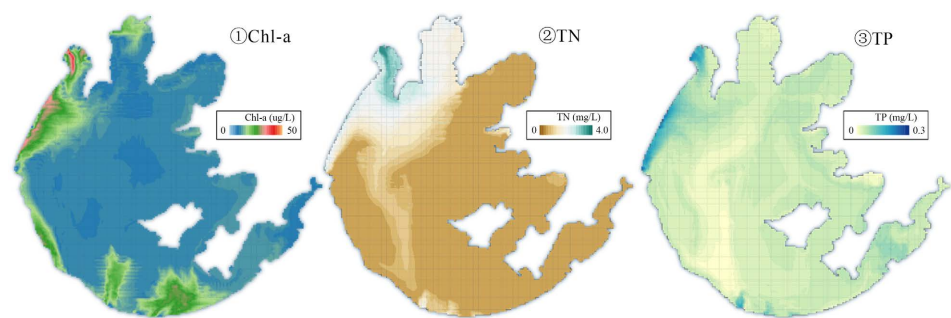


Figure 4. Annual simulation results of water quality and water ecological level of Taihu Lake
图 4. 太湖水质水生态水平年模拟结果

3.2. 调水对太湖水龄的提升

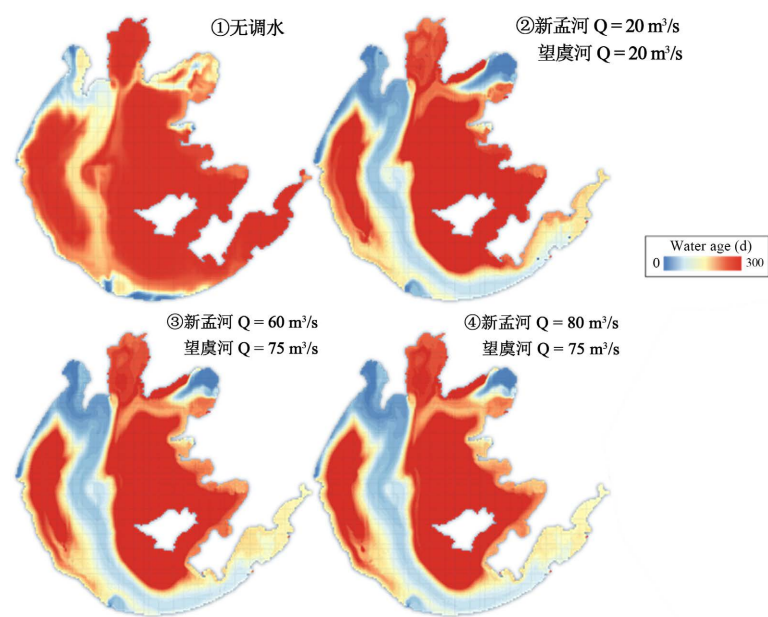


Figure 5. Distribution of water age of Taihu Lake under different water diversion scenarios under the new diversion and drainage pattern
图 5. 新引排格局不同调水情景下太湖水龄的分布

水龄是指水质点离开水源后到达特定位置所需要的时间，其在一定程度上可以反映出异质空间水交换效率，并揭示出水环境水动力特性[7]。例如，Li 等人[8]利用 EFDC 模型，以水龄为评估指标揭示了“引江济太”工程对太湖水质演替的影响。Gai 等人[9]通过 Delft3D 模型，也利用水龄分析了香溪河库湾水体水质垂向分布的时间动态。本研究分析了新孟河不同引水流量序列下太湖的水龄变化，结果如图 5 所示。无调水情况下，太湖湖区水龄平均值为 225 d，低水龄值主要分布在太湖河流入湖口周围，以竺山湖、西部沿岸区、贡湖、南部沿岸区为主。在新孟河不同调水流量引入后，太湖湖区的平均水龄值分别降低了 6%~9%，流量越大，水龄值降低越多。低水龄值的分布范围也有所拓展，延伸至贡湖和湖心区等区域。此外，研究发现竺山湖—湖心区—太浦河出口水龄值明显低于其他水域，且水龄值随着调水流量增加而降低，表明调水流量增强了湖泊的水动力交换。同样，胥等人[10]通过多元线性逐步回归法发现出入湖流量是影响水龄主要因素，影响权重高达 64.41%。在情景 1-4 下，湖西区、湖心区、东部沿岸区存在湖泊环流引起的高水龄区。故引水流量的增加可显著增强湖泊水动力交换能力，减少湖水滞留区。

3.3. 调水对太湖水质的影响

新孟河现状水质调水下，调水流量的增加引起了湖区 TN 和 TP 污染负荷的增加，两者分别升高了 1.2%~9.9%和 6.3%~13.8% (图 6)。因此，新孟河在维持现状水质调水情况下会导致湖泊水体氮磷负荷的增加。进一步优化新孟河入湖水质后，TN 和 TP 的浓度从增加转变为下降 3.7%~6.2%和 6.3%~8.8%。因此，在引水流量调配的同时，应首先控制引水河道的水质，进而提升太湖湖区的水质。

调水在一定程度上可以改善湖水的交换效率，但流量的增加也会同时带入更多的外源污染源，尤其是在引江济太工程中，从长江引入的水源中磷污染负荷较高[11]。同时，调水过程也可能促进底泥中氮磷的再悬浮和释放，从而增加其在水体中的浓度[12]。因此，调水可能通过引入外源污染和促进内源污染扩散释放而提升湖区的总氮和总磷浓度。这表明调水过程必须充分考虑不同水域的水文条件和污染负荷。在水质管理中，应在提高水体流动性和促进水质改善的同时，合理控制外源营养盐的输入，以避免调水措施导致水体富营养化问题的加剧。

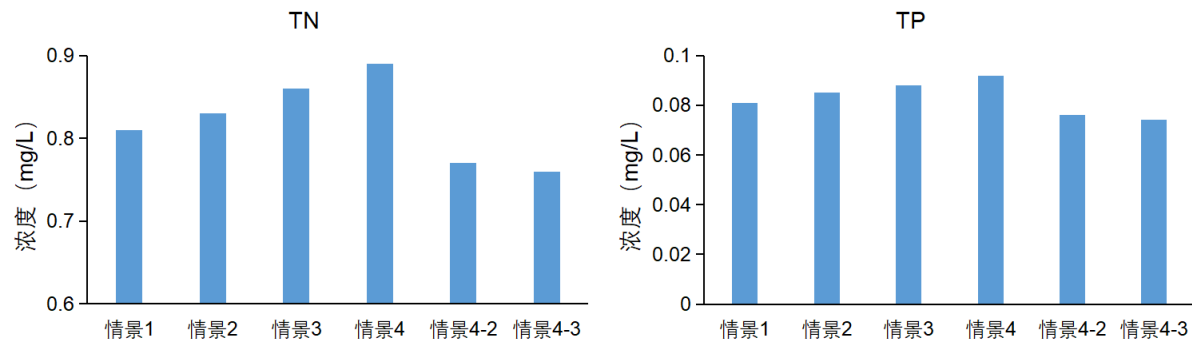


Figure 6. Water quality response of Taihu Lake under different water diversion scenarios under the new diversion and drainage pattern
图 6. 新引排格局不同调水情境下太湖湖区水质响应

3.4. 调水对太湖水生态的提升

蓝藻防控是太湖水生态安全保障的主要目标，而 Chl-a 是指示湖区蓝藻聚集和爆发情况的重要指标。新孟河不同引水流量下，太湖湖区的 Chl-a 浓度变化如图 7 所示。无调水情况下，太湖湖区 Chl-a 平均浓度为 10.34 $\mu\text{g/L}$ ，高浓度区分布在竺山湖、梅梁湖、西部沿岸区、南部沿岸区。在新增新孟河 20、60 和 80 m^3/s 调水流量下，太湖湖区的 Chl-a 平均浓度分别下降了 13.34%、20.1%和 21.5%，表明无论引水水

质如何，调水流量的增加均会通过稀释作用降低湖区的 Chl-a 浓度。其中，竺山湖、西部沿岸区和梅梁湖的 Chl-a 浓度降低幅度更为明显，竺山湖的 Chl-a 浓度最高降低了 26%。竺山湖作为新孟河引水的入湖通道，直接受到引水的冲击，明显降低了该区域内的藻类聚集和爆发风险。

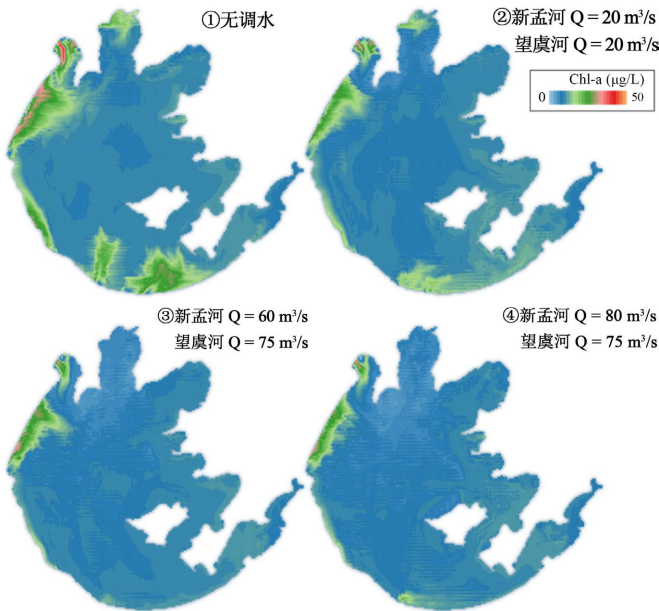


Figure 7. Chl-a distribution in Taihu Lake area under different water diversion scenarios under the new diversion and drainage pattern
图 7. 新引排格局不同调水情景下太湖湖区的 Chl-a 分布

3.5. 太湖调水工程的优化调度

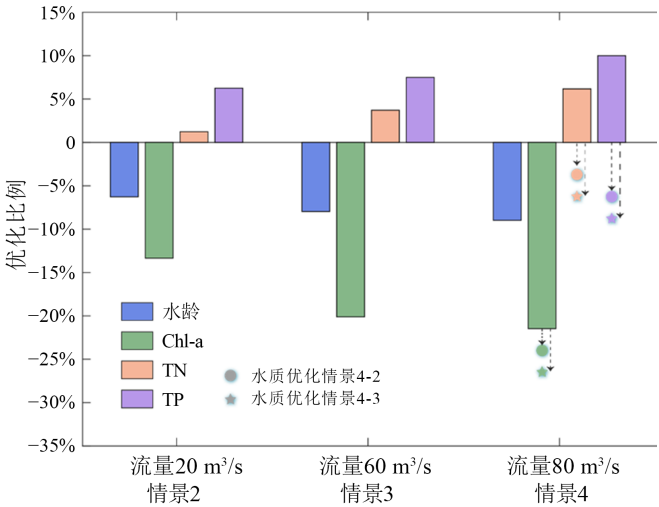


Figure 8. Taihu Lake water quality optimization degree under different water diversion scenarios of the new diversion and drainage pattern
图 8. 新引排格局不同调水情景下的太湖水龄水质优化程度

新引排格局不同调水情景下太湖湖区平均水龄、水质(TN、TP)和水生态(Chl-a)的变化程度如图 8 所示。水龄和 Chl-a 的浓度随调水流量的增加而降低，水龄优化比例为-6.2%~-9.0%，Chl-a 的优化幅度为

-13.5%~-21.5%，调水对两者的优化缓解效果较为明显。然而，调水流量的增加引起了湖区 TN、TP 的显著增加，两者在现状水质调水情景下分别升高了 1.2%~9.9%和 6.3%~13.8%。因此，在维持水质现状情况下，提高新孟河调水流量会引起太湖水体氮磷负荷的增加。

基于此，选取情景 4 的调水流量(80 m³/s)，通过进一步优化新孟河入湖水质，解析调水对湖区水生态功能的影响。研究发现，新孟河入湖水质提升后，湖区的 Chl-a 浓度进一步优化至-23.2%和-25.8%，TN 浓度分别下降了 3.7%和 6.2%，TP 浓度下降了 6.3%和 8.8%，入湖水质提升越高，湖区的水生态功能缓解和保障效果越好。因此，在引水流量调配的同时，控制河道进水水质有助于同时实现湖泊的水质提升和藻类防控。

4. 结论

新引排格局下，新孟河引水可以显著降低湖区水龄和 Chl-a 浓度，增强水体的流动性，降低藻类生长聚集的风险，引水流量越大，提升效果越明显，尤其在流动性较差的竺山湖和梅梁湖区域。同时，新孟河引水流量的增加也可能通过外源输入和内源释放等途径增加太湖湖区的氮磷等营养盐水平，入湖水质优化提升后，其污染负荷得以消减。因此，“二引三排”新格局下，综合考虑藻类抑制和水质、水龄等变化，望虞河现状调水和新孟河 60~80 m³/s 调水量下，太湖面向太湖水生态功能的提升效果最为明显，合理的引水量可有效抑制藻类过度生长，并应当避免过量或不足引水可能引发的水质问题。

基金支持

本研究得到江苏省水利科学院“水域专项研究”项目支持。

参考文献

- [1] 王宗志, 白莹, 杜慧华, 刘克琳, 程亮, 王坤, 王文琪. 调水影响下湖泊流域水资源多尺度演变与安全调控[J]. 中国水利, 2024(13): 27-33.
- [2] Yao, X., Zhang, L., Zhang, Y., Du, Y., Jiang, X. and Li, M. (2018) Water Diversion Projects Negatively Impact Lake Metabolism: A Case Study in Lake Dazong, China. *Science of The Total Environment*, **613**, 1460-1468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.130>
- [3] 苏红兵, 张天明, 胡朝英. 基于生态足迹的调水工程环境影响评价——以牛栏江-滇池补水工程为例[J]. 人民长江, 2015, 46(10): 48-51.
- [4] 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚. 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2778-2786.
- [5] 汪锋, 钱庄, 张周, 张雅晶, 缪恒锋. 竺山湖主要入湖口水质及富营养状态评价[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 64-67.
- [6] 朱伟, 薛宗璞, 刘环, 程林, 张昱, 赵帅, 冯甘雨, 王若辰. 引水工程出水路线的优化对太湖总磷格局的影响——基于新孟河工程的思考[J]. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1175-1185.
- [7] 黄爱平, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 韩祯, 王伟杰. 鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1082-1090.
- [8] Li, Y., Acharya, K. and Yu, Z. (2011) Modeling Impacts of Yangtze River Water Transfer on Water Ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, **37**, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.024>
- [9] Gai, B., Boehrer, B., Sun, J., Li, Y., Lin, B. and Shatwell, T. (2024) Vertical Water Age and Water Renewal in a Large Riverine Reservoir. *Journal of Hydrology*, **631**, Article ID: 130701. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130701>
- [10] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰, 朱天依. 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 34-39.
- [11] 潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华. “引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2800-2808.
- [12] 郑保强. 水闸调度对河流水质作用机制及可调性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2012.