J. Lake Sci.(湖泊科学), 2022, **34**(5): 1393-1412
DOI 10.18307/2022.0500
© 2022 by *Journal of Lake Sciences*

“引江济太”20年:工程实践、成效和未来挑战*

吴浩云[1],甘月云[2**],金　科[1]
(1:水利部太湖流域管理局,上海 200434)
(2:太湖流域管理局水文局(信息中心),上海 200434)

摘　要: 过去几十年太湖流域经济社会快速发展,但由于经济增长方式尚未根本转变,流域水循环系统遭到无序干扰和破坏,太湖水污染问题严重,水质型缺水问题突出,流域水安全面临巨大挑战. “引江济太”作为太湖流域水安全保障的关键措施和流域水环境综合治理的重要举措,自2002年启动实施以来,以丰补枯,增加流域水资源供给;以动治静,抑制太湖蓝藻大规模暴发,改善流域区域水环境;科学应对,保障突发水污染事件和重大活动期间供水安全,取得了显著的综合效益,社会各界予以了广泛关注. 本文基于监测数据和大量文献,在综述“引江济太”实践背景、过程和成效的基础上,重点围绕“引江济太”调度模式、水量水质保障、洪旱风险管控、调水事件驱动等进行了研究. 结果表明,“引江济太”通过试验探索回答了流域治理管理的一些关键科学问题,已经成为提升流域水资源和水环境承载能力的重要手段. 面对极端气候变化、流域水循环格局变化、保障长三角一体化高质量发展水安全新需求和挑战,建议“引江济太”实践中,探索多目标统筹协调调度、开展数字孪生太湖调水、促进流域骨干水网建设,实现”引江济太”综合效益最大化.
关键词: “引江济太”;成效评估;因子分析;太湖

A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002-2021: Practices, achievements and future challenges*

Wu Haoyun[1], Gan Yueyun[2**] & Jin Ke[1]
(1: *Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources*, *Shanghai* 200434, *P.R.China*)
(2: *Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Basin Authority*, *Shanghai* 200434, *P.R.China*)

Abstract: In the past decades, Taihu Basin has witnessed rapid economic and social development. However, due to the lack of corresponding alternation in the economic growth mode, the water circulation system of Taihu Basin has been disturbed and destroyed, resulted in great threaten in the water security. As a key measure to ensure water security and an important measure to comprehensive water treatment in Taihu Basin, the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu has been launched since 2002. Supplementing drought with increased abundant water resources, suppressing the large-scale outbreak of cyanobacteria in Lake Taihu and improving water environment in the basin, prompt response to water pollution crisis to ensure the safety of water supply, the water diversion project has achieved remarkable comprehensive benefits which attracted extensive attention from social public. Based on monitoring data and published literatures, the paper reviewed the background, process and achievements of water diversion practice focusing on the scheduling mode, water quantity and quality ensure, flood-drought risk management and water diversion event-driven. The results show that water diversion project has resolved some key scientific questions of management through series of practices and exploration, and has become an important means to improve the carrying capacity of water resources and environment. Facing extreme climate and water cycle pattern changes of the basin, new demands and challenges emerged to ensure water security of the integrated high-quality development of Yangtze River Delta. It is suggested that multi-objective coordination scheduling should be explored, water diversion based on digital twin should be carried out, and water network construction should be promoted to maximize the comprehensive benefits of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu.
Keywords: Water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu; achievements assessment; factors analysis; Lake Taihu

---

* 2022-06-29 收稿;2022-08-03 收修改稿.
国家重点研发计划项目(2018YFC0407900)资助.
** 通信作者;E-mail:ganyueyun@tba.gov.cn.

太湖流域位于长三角核心区域,是我国工业化程度和城市化水平最高的地区之一,也是我国综合实力最强的区域之一. 20 世纪末,由于太湖流域不合理的经济增长方式,流域水问题凸显,主要表现在流域本地水资源量不足,水污染较为严重,水质型缺水状况较为突出等方面,制约着社会经济可持续发展. 据 2000 年监测结果,流域河网 80% 水体水质劣于地表水Ⅲ类标准,太湖 83% 水体达到富营养水平,夏季时有蓝藻暴发,严重威胁太湖流域大中城市供水安全[1-2]. 太湖水污染问题早已引起党中央、国务院的高度重视和社会的广泛关注[3-4],按照国务院要求,为保障人民群众饮水安全,由水利部统一管理、合理配置水资源,采取节水、调水、清淤等综合治理措施,改善太湖水环境质量. 经过各方共同努力,在水利部太湖流域管理局有效组织下,在受到人类活动高度影响的大型复杂平原河网和湖泊地区开展"引江济太"原型试验,依托已建治太骨干水利工程,利用望虞河调引长江清水入太湖及周边河网,并结合雨洪资源利用,通过太浦河等环湖口门向太湖周边城市及下游地区供水(图 1),增加流域水资源量,加快河湖水体流动,促进水环境改善和水生态修复[5-6].

"引江济太"是一项复杂的系统工程,涉及到流域气候演变、经济社会发展、洪涝风险、水资源配置、生态环境和泥沙淤积等复杂因素. "引江济太"调水试验就是要探讨流域引水与防洪、用水、排水的关系,分析清水入湖对改善太湖水体水质和复苏河湖生态的作用,探索运行管理体制与机制,为保障流域防洪、供水和水生态安全提供技术支持[7-9]. "引江济太"由调水试验,到扩大试验,再到常规运行,2007 年无锡供水危机后实施的太湖流域水环境综合治理将其作为遏制太湖蓝藻暴发、确保太湖水源地供水安全的重要措施之一[10]. 通过"引江济太"等太湖综合治理和系统治理措施,太湖流域水环境状况显著提高,河湖水体置换加快,太湖以及入湖河道水质明显好转,保障了重要城市水安全[11-13]. 太湖流域治理稳步推进,但影响太湖水质改善的因素依然复杂,恢复良好的生态环境需要长期的过程. 近年来,流域水情、工情、水环境、水生态及区域工程引排格局发生了较大变化,在当前全球气候变化和流域区域一体化高质量发展背景下,太湖流域治理管理面临新形势、新任务,也面临一系列新挑战,突出体现在水环境治理形势更加严峻、流域多目标协调调度更加困难、人民对水安全的需求更加迫切等方面. 统筹防洪、供水、水生态、水环境等不同需求的流域多目标调度问题复杂,以"引江济太"为主的流域水资源调度仍需在实践中细化和完善. "引江济太"实施 20 年来,影响深远广泛,很多学者对其进行了广泛的研究[10-13],但对"引江济太"系统研究分析较少. 基于此,本文深入总结"引江济太"20 年来的实践成效和经验,分析"引江济太"在保障流域水安全方面所面临的困难和挑战,探索流域治理管理模式创新[14],对保障流域水安全,持续维护河湖健康,服务长三角一体化高质量发展,具有重要的理论和实践意义.

1 实践过程、数据来源和分析方法

1.1 "引江济太"实践过程

1.1.1 试验探索阶段(2002－2006 年) 2002 年 1 月 30 日"引江济太"调水试验正式开始,初期重点开展沿江不同引排调度方式下望虞河入湖效率、望虞河东岸口门运行对西岸超标污水入望虞河及入湖效率、环太湖工程运行方式与改善太湖及周边水环境等综合影响研究,通过两年试验顺利完成预期的试验目标和任务[2,15],共调引长江水 42.2×10^8 m^3,入太湖清水 20.0×10^8 m^3,通过太浦闸向下游供水 32.2×10^8 m^3,实现了流域水资源优化配置,加快了太湖及周边河网水体流动,提高了水体自净能力,改善了水环境,保障了流域内居民生活用水和重要城市工农业用水. 为进一步扩大"引江济太"受益范围,提高流域水资源水环境承载能力,2004 年起重点围绕加大引水力度对改善太湖水质和河网水环境[16-17]、望虞河东岸口门运行方式对下游阳澄淀泖区供水和水环境[18]、环太湖口门调整方式对杭嘉湖地区供水和水环境[19]、太浦闸控制运用对下游及黄浦江取水口水量水质等影响研究[20-22],并积极探索"引江济太"长效运行的体制机制.

1.1.2 拓展实践阶段(2007－2011 年) 在探索"引江济太"转入改善太湖水环境、保障太湖供水安全等长效运行的同时[23],结合水雨情、相机开展"引江济太"改善杭嘉湖地区水环境试验、望虞河东岸口门运行对入湖效率和改善苏州城市水环境影响研究、沿江口门联合运行对改善常镇地区调水试验、保障上海重大水源地切换等探索研究[24],进一步拓展"引江济太"范围,并在实践中不断丰富调水内涵,提升流域供水保障能力,使"引江济太"成为惠及全流域的重要调度手段,特别是在应对 2007 年无锡供水危机[25],有效保障 2010

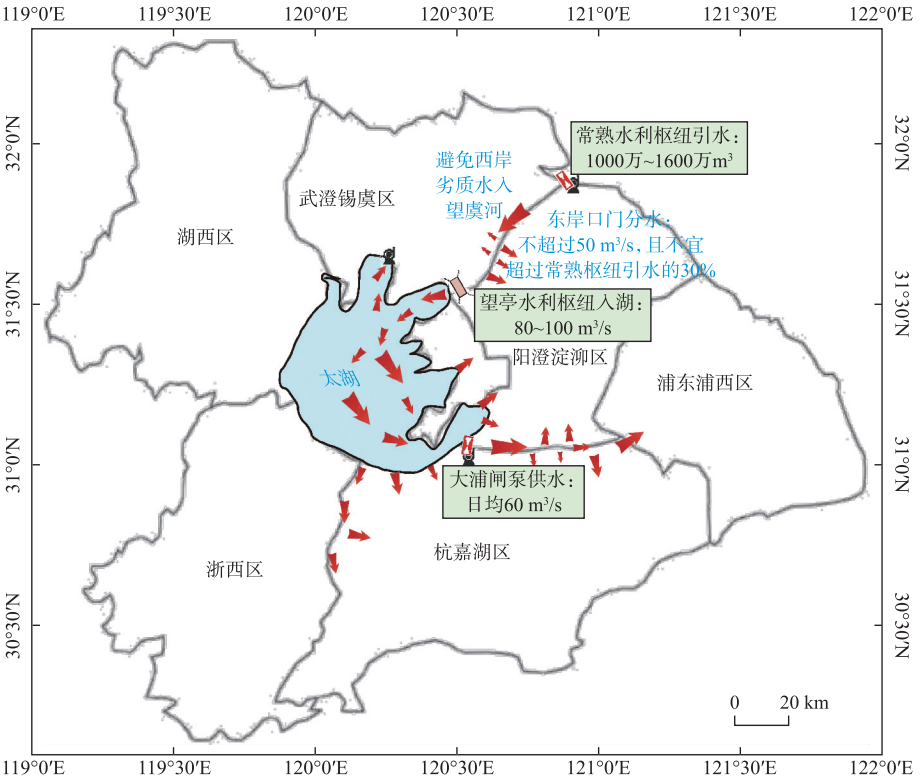


图 1 太湖流域“引江济太”调水示意图

Fig.1 Diagram of water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu

年上海世博会[26]、2011年持续严重气象干旱下的流域供水安全[27]等方面发挥了重要作用.

与此同时,着眼长远,不断完善“引江济太”机制. 在各方努力推动下,2009年水利部批复了《太湖流域引江济太调度方案》,2011年国家防汛抗旱总指挥部批复了《太湖流域洪水与水量调度方案》[28],2011年国务院颁布施行了《太湖流域管理条例》,为“引江济太”规范化、标准化和精细化提供了制度保障.

1.1.3 延伸升华阶段(2012—2021年) 流域各级政府坚持新发展理念,积极践行习近平总书记提出的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路,认真落实法律法规和批复的调度方案,深入推进太湖流域水环境综合治理,实行最严格的水资源管理制度,持续深化提升“引江济太”. 立足于“控水位、促流动、防蓝藻、保供水”的目标,“边引边排、小引大排、供排结合”等调度措施,在关注应急调水的同时,更加重视流域冬春季供水安全保障问题,为预防春季太湖蓝藻暴发赢得主动[29]. 通过建设太湖流域水资源监控与保护系统[30]、智慧太湖一期工程[31],建立水环境信息共享机制[32],统筹增加水资源、保障供水安全、复苏水生态、改善水环境等需求[33],依法科学实施“引江济太”,实现太湖与长江、周边河网互动,增加流域供水,促进水体有序流动,缩短换水周期,太湖水质持续改善[11,13],美丽幸福太湖建设取得显著成效[34].

1.2 数据来源

“引江济太”始于2000年太湖流域应急调水[2],正式启动于2002年初,依托太湖流域平原河网开展原型科学试验,采用水文学、水动力学、环境科学、生态学、信息技术等多学科交叉的途径,进行技术攻关、系统集成和应用实践. 在调水试验和应急调水中,太湖流域管理局组织有关省市和合作单位开展了大规模的水文水资源同步监测. 根据调水需求,及时优化监测站点布局和监测频次,联合开展了引水影响区域内望虞河、太浦河等环太湖出入湖主要河道的重要断面和节点安排布置水量、水质进行常规监测,重点监测太湖、望虞河、太浦河等重要水体水量水质、蓝藻丰度等;建立了太湖湖体、饮用水水源地和出入湖河道水资源动

态监测系统,涵盖水位、流量、水质、蓝藻丰度等水文气象和水生态要素等,系统收集了大量的实测数据,为科学、精准调控水利工程提供及时、可靠的决策支持,仅2002－2006年第一阶段就收集监测了55万组水文、环境、气象、泥沙和生态数据. 2007年"引江济太"不断延伸、深化、升华,截至2021年相继开展了53次"引江济太"调水(表1). 与此同时,科研院校结合国家重点研发计划、水专项等与太湖相关的课题,开展原型观测、实验和研究等,积累了大量的研究成果和文献[14].

表1 2002－2021年历年分阶段"引江济太"调水事件

Tab.1 Water diversion events from Yangtze River to Lake Taihu in different stages from 2002 to 2021

事件	编号	开始日期	结束日期	调水主要缘由	事件	编号	开始日期	结束日期	调水主要缘由
1	200201	01-30	04-03	调水试验	27	201201	01-01	02-06	水位呈下降趋势,供水安全
2	200202	08-05	08-12	前期水位下降较快,调水试验	28	201202	07-30	08-01	预防蓝藻,改善水环境,应急调水
3	200203	09-16	11-11	改善水环境,调水试验	29	201203	10-18	12-31	维持太湖合理水位,供水安全
4	200301	02-17	03-05	改善水环境,调水试验	30	201301	01-01	02-06	水位下降,供水安全;上海市金山区朱泾镇掘石港突发水污染事件
5	200302	08-05	08-20	应急调水,太湖部分湖湾蓝藻暴发;50年一遇的高温少雨;黄浦江上游油污清污行动	31	201302	07-22	10-05	高温少雨,水位下降,供水安全
					32	201303	11-19	12-31	多日无雨,水位下降,供水安全
6	200303	08-21	12-31	供水安全,调水试验	33	201401	01-01	03-27	供水安全
7	200401	01-01	05-12	调水试验	34	201402	10-24	12-31	多日无雨,水位下降,供水安全
8	200402	06-28	07-07	改善水环境,世界遗产大会,重大活动	35	201501	01-01	02-16	供水安全
9	200403	07-22	12-31	高温少雨,供水安全,改善水环境	36	201502	10-26	11-24	调水试验,重大水专项、第二届互联网大会
10	200501	01-01	05-13	供水安全,改善水环境,调水试验					
11	200502	06-17	07-13	太湖水位偏低,供水安全,调水试验	37	201601	03-05	04-01	预防蓝藻,改善水环境
12	200601	03-22	04-05	太浦河流量与下游水源地水质影响关系试验	38	201602	08-30	09-12	高温少雨,供水安全,G20杭州峰会,重大活动
13	200602	06-04	06-19	供水安全,上海合作组织峰会,重大活动	39	201701	02-14	03-12	改善水环境
					40	201702	05-15	06-06	缓解蓝藻暴发,改善水环境,供水安全,应急调水
14	200603	08-08	10-15	水位下降较快,供水安全,调水试验					
15	200701	05-06	07-04	应对太湖蓝藻暴发无锡供水危机,应急调水	41	201703	08-14	09-12	缓解蓝藻,改善水环境,供水安全
					42	201704	12-11	12-31	水位下降,供水安全
16	200702	07-18	09-18	局部湖湾蓝藻暴发,供水安全,应急调水	43	201801	01-01	02-12	供水安全
					44	201802	10-23	12-03	水位下降,供水安全,中国进口博览会,重大活动
17	200801	01-10	06-08	预防蓝藻,改善水环境					
18	200901	04-27	06-28	部分湖湾出现蓝藻,改善水环境	45	201901	10-17	12-31	水位下降,供水安全,中国进口博览会、世界互联网大会,重大活动
19	201001	01-27	03-04	前期水位下降较快,贡湖水源地恶化,供水安全					
					46	202001	01-01	01-17	供水安全
20	201002	05-25	06-17	前期水位下降较快,供水安全	47	202002	05-21	06-02	缓解蓝藻,改善水环境,供水安全
21	201003	06-30	07-05	前期降雨偏少,供水安全	48	202003	06-06	06-08	贡湖北部异常水体,改善水环境,应急调水
22	201004	08-13	09-10	高温少雨,水位下降较快,蓝藻水华面积增大;供水安全,上海世博会,重大活动	49	202004	12-25	12-31	水位下降,供水安全;根据调水启动机制,江苏省提出申请
23	201005	10-08	11-08	前期水位下降较快,供水安全,改善水环境,上海世博会,重大活动	50	202101	01-01	02-10	供水安全;根据调水启动机制,江苏省提出申请
24	201006	11-20	12-31	上海青草沙原水系统通水切换,应急调水	51	202102	02-27	03-22	前期水位下降,保障供水安全,改善水环境
25	201101	01-01	06-09	太湖流域60年来最严重的气象干旱,供水安全	52	202103	04-30	05-27	供水安全,改善水环境;长三角地区主要领导人座谈会,重大活动,应急调水
26	201102	10-31	12-31	水位持续下降,供水安全	53	202104	12-07	12-31	水位下降,供水安全

本文所采用的太湖流域重要站点、重要断面等的水文水资源数据来自流域机构和地方水文部门的资料整编成果,其它水文水资源监测统计数据来自太湖流域管理局组织编制的年度《太湖流域水资源公报》《太湖流域水情年报》《太湖流域引江济太年报》《太湖健康白皮书》等.

1.3 分析方法

通过收集核心期刊、经典著作、专职部门的研究报告、重要的观点和论述等,深入探讨“引江济太”有关实践、成效等;根据2002－2021年53次“引江济太”调水事件,梳理了太湖水位、环太湖主要入湖水量水质等数据;依据《太湖流域引江济太调度方案》《太湖流域洪水与水量调度方案》及年度《引江济太调度计划》,基于数理统计法,研判调水期间的太湖防洪风险、入湖水量水质保障能力等;利用SPSS 25软件对调水事件的驱动因子进行主成分分析后综合评分.

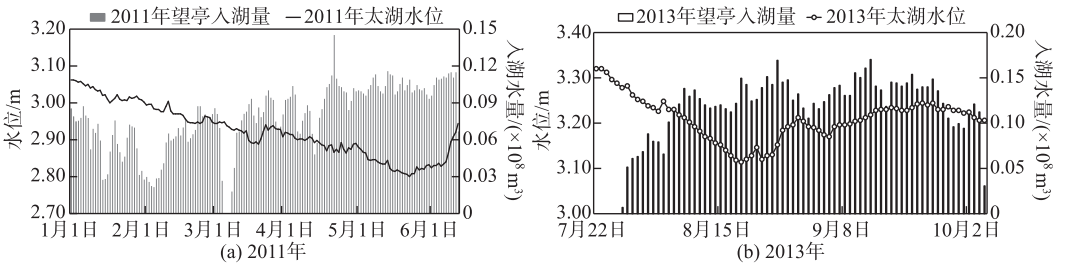
2 成效分析

2.1 实现了利用水利工程提升水资源和水环境承载能力的目标

“引江济太”以太湖流域骨干水利工程调控为依托,以提升太湖及河网水资源水环境承载能力为重点,以流域水资源的可持续利用支撑经济社会可持续发展为目标,将长江水调入太湖并供给望虞河两岸地区,经太湖调蓄后,将太湖清水供给到太浦河下游及环太湖周边地区,以促使湖湾水体加快交换,增加流域水环境容量、水资源供给,改善太湖和河网水体水质,初步回答了时任国务院总理温家宝对“引江济太”提出的“以动治静,以清释污,以丰补枯,改善水质”的要求.

以动治静,加快了太湖及河网水体流动. 通过骨干工程调度,将长江清水以100~120 m^3/s的流量引入太湖,保持并适当抬高太湖和河网水位,河网水量的增加使广大平原河网水动力条件得到增强,太湖换水水龄减小[11,13,35];望虞河、太浦河沿线河网及太湖贡湖水域水体流速明显加快,受益地区河网流速由原来的0.1 m/s提高到0.2~0.3 m/s[2,36];引水后,由于进入望虞河的水量稳定且水质好,望虞河的稀释能力和自净能力明显提高,环湖周边河网的稀释能力和自净能力也随之逐步提高,高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮的降解系数分别为0.06、0.04、0.02和0.04 d^{-1}[35],太湖及河网水质得到不同程度的改善[4-5],受益范围最大可达2万km^2,约占流域河网面积的2/3.

以丰补枯,增加了流域水资源的有效供给,保证了流域各地的生活、生产和生态用水需求,满足了流域航运、电力、渔业、旅游等行业用水需求[37];特别是在2011年上半年太湖流域发生近60年来同期最严重的气象干旱,以及2013年流域出梅后持续高温少雨、多地气温及持续时间创历史记录时,通过实施“引江济太”(图2),有效减缓了太湖及地区河网水位下降趋势,极大地避免了太湖水位低于2.80 m(太湖旱限水位),为周边地区用水创造了有利条件[27,38],也促进了水体流动,增加了太湖水环境容量[39].



(a) 2011年

调水时段:1月1日－6月9日

常熟引水量:21.3×10⁸ m^3

望亭入湖量:12.5×10⁸ m^3

(b) 2013年

调水时段:7月22日－10月5日

常熟引水量:12.4×10⁸ m^3

望亭入湖量:8.6×10⁸ m^3

图2 2011和2013年流域发生干旱时望亭入湖量与太湖水位的对比

Fig.2 Comparison of Wangting diversion and Lake Taihu level during drought in 2011 and 2013

改善水质,在蓝藻水华暴发时,引长江Ⅱ~Ⅲ类水入太湖,增加湖体水环境容量,适度降低藻丰度、缓解藻华危害[40-42];强力推进流域综合治理,完善水资源配置和工程调度,实施流域骨干引排工程和水源地建

设、蓝藻打捞、底泥疏浚、水生态修复,水质改善成效显著:与 2007 年相比,除总磷浓度处在高位波动外,太湖富营养化关键性水质指标氨氮、高锰酸盐指数已明显下降[11-12](图 3);尤其是 2020 年后,望虞河西岸控制工程启用后有效减少了望虞河与西岸地区的水量交换,保证了望虞河引江入湖的水量,望亭水利枢纽引水入湖水质始终保持优异(Ⅱ~Ⅲ类),受益水体水质优于Ⅱ类水标准的监测断面比例上升了 30%,改善范围也随着引水量的增加而增加. 局部河网和湖湾因受特殊地形、水系特性、引水顶托、污染治理不力、生态系统受损等影响,水环境改善不够明显,甚至出现恶化的趋势[43-46];鉴于生态修复工程可以弥补调水在局部湖区水质改善效果不足的短板,如冬春季适时开展"引江济太",统筹汛前期防洪安全、供水安全,科学调控太浦闸流量,保持太湖适宜水位,有利于促进太湖水草生长[47],二者结合使太湖整体水环境、水生态得到了改善.

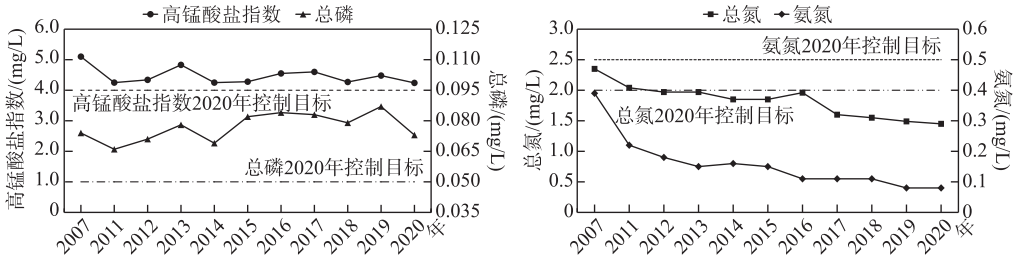


图 3 近年来太湖主要水质指标变化

Fig.3 Changes of main water quality indexes in Lake Taihu in recent years

2.2 回答了"引江济太"试验和运行中的一系列关键科学问题

"引江济太"启动之初就遵循确有需要、生态安全、可以持续的重大水利工程论证原则,以科技为先导,以试验为依托,紧紧围绕调水中存在的问题,联合有关科研院校开展多学科技术攻关,利用治太骨干工程进行跨流域调水原型试验和观测研究,并采用数值模拟和系统集成技术,开展长江来水与太湖用水的关系、太湖引水与防洪排水的关系、调水泥沙淤积影响、望虞河引水规模与环境影响等专题研究论证[6],同时对大型平原河网水量水质联合调度[48]、太湖富营养化机制[49]、调水区与受水区的利益关系[18-19]等进行了深入研究,为扩大和持续开展"引江济太",合理利用长江水资源改善太湖及河网水生态环境、保障水源地供水安全提供科学依据.

经过"引江济太"实践探索和大量数据系统分析,联合调控"引江济太"骨干工程(图 1),长江清水 5~6 天就可以通过望虞河入太湖,控制望亭水利枢纽入湖水量为 80~100 m^3/s 为宜. 探索利用太湖雨洪资源向下游增加流域供水,可保障太浦河下游水源地供水安全,且最大限度地节约调水试验资金. 调水期间,太湖水位不宜超过太湖防洪控制水位,严格控制入湖水质总磷、高锰酸盐指数等主要调度指标优于Ⅲ类,新辟望虞河西岸地区排水专道,提高望虞河引长江水入太湖的效果(东岸分流不宜超过常熟水利枢纽引水的 30% 且不超过 50 m^3/s,维持望虞河干流水位,避免西岸劣质水入望虞河).

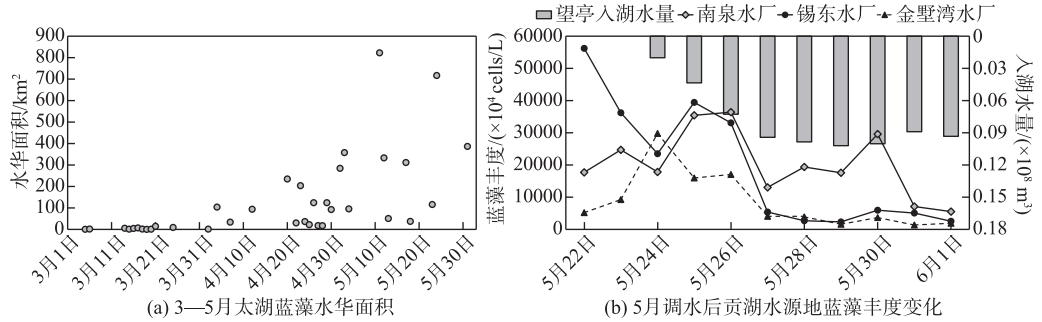
望虞河长江充沛水量与入湖优质水量为改善太湖和河网水环境、提供环湖周边地区用水等提供了水源保障,通过加快水体流动[35]、降低湖体藻类丰度[40]、改善太湖部分湖区的水动力特征[46],提高了太湖周边水源地供水安全的保障程度(图 1),缓解夏季水华暴发态势、确保太湖安全度夏. 实践证明,"引江济太"在应对处置 2007 年无锡供水危机[25]、2017 和 2020 年太湖北部湖湾蓝藻暴发、2020 年贡湖水源地周边水质异常中发挥了重要作用;但近 10 年来太湖蓝藻水华强度仍有明显上升趋势,其根本原因是入湖污染物总量远超湖泊水环境容量,太湖藻型生境没有改变,只要气温、光照、风力等外部条件具备,太湖就可能大面积暴发蓝藻水华;冬季水温升高、夏季东南风风速减弱等均是蓝藻丰度升高、水华影响范围扩大的多方面原因[50].

"引江济太"是一种多尺度、流域性与区域性并存的水工程调度,通过组织加强流域监测、预测、决策等调控能力建设,可以使洪水调度和水资源调度有机结合、流域调度和区域调度有机结合、水量调度和水质调度有机结合、汛期调度和非汛期调度有机结合,调控太湖水位,适度承受风险,优化水资源调度,提升太湖自净能力,实现流域防洪安全和供水安全,促进流域水环境、水生态的好转[33,51]. 根据区域水文系统要素变化的特点,提出了利用太湖调控流域和河网,形成流域、区域、太湖 3 个层次相结合的河网多层次、多途径调水

循环体系的新构思,制定了“引江济太”面对太湖及河网不同情势的实施方案和应对突发水污染事件的应急预案;建成了水资源监测系统,统筹防洪、供水和改善水环境、水生态的需要,实现水量水质实时联合调度,不断推进流域综合治理、统一调度.

2.3 成功应对了流域重要水源地的供水危机,有效保障了国家重大活动期间供水安全

多年来,“引江济太”通过望虞河引水、太浦河供水,提高了太湖河网的水环境容量,促使太湖北部湖湾水体加快交换,产生的动力掺混环境,有利于抑制湖湾蓝藻水华的发生. 2007年5月底,太湖梅梁湖、贡湖等湖湾出现大规模蓝藻水华,位于太湖贡湖的无锡市锡东、南泉水厂水源地甚至出现黑臭水体,供水安全受到严重威胁. 为应对无锡市供水危机,紧急启动“引江济太”,最大限度地加大望虞河引江入湖水量,直接受水的贡湖水域水质明显好转,承担着无锡市20%居民供水的锡东水厂水质迅速稳定[25]. 2020年5月,受持续高温少雨影响,梅梁湖、贡湖等出现较大面积蓝藻水华(图4a). 为保障太湖安全度夏,5月21日—6月2日实施了“引江济太”调水,有效缓解了太湖北部水源地蓝藻暴发的严峻形势,其中锡东水厂水源地改善效果最为明显(图4b). 2021年首度实现Ⅱ类水入湖目标,助力太湖连续14年实现“确保饮用水安全、确保不发生大面积水质黑臭”[52-53].



(a) 3—5月太湖蓝藻水华面积　　(b) 5月调水后贡湖水源地蓝藻丰度变化

图4 2020年5月下旬“引江济太”缓解太湖北部湖湾蓝藻暴发

Fig.4 The effect of alleviating cyanobacteria outbreak by emergency water diversion from Yangtze River to Lake Taihu, late May 2020

“引江济太”是实现“静态河网、动态水体、科学调度、合理配置”战略目标的重大举措,最终目标是通过望虞河将长江水引入太湖,由此带动其他水利工程的优化调度,加快水体流动,提高水体自净能力,实现流域水资源优化配置,改善河湖水生态、水环境. 调水期间,引入的长江水通过望虞河东岸口门分流入阳澄淀泖区、西岸口门分流入武澄锡虞区,引水主干河道望虞河水质改善最为明显,连接望虞河的武澄锡虞区东部河道水质改善次之,阳澄淀泖区也得到不同程度的改善. 根据实测水质资料对比分析表明,引水期间望虞河干流诸断面改善1~3个水质类别,运河与望虞河交汇处下游一定范围内水质改善1个类别,武澄锡虞区东部靠近望虞河的河段改善2~3个类别,阳澄淀泖区靠近望虞河断面水质改善1个类别[2],特别是2004年主汛期,通过联合苏州市区西塘河引水工程,成功实施了第28届世界遗产大会在苏州召开期间的区域水环境调度工作.

经太湖调蓄后,通过太浦河闸(泵)等环太湖口门将太湖清水供给到太浦河下游及环太湖周边地区,对区域水质发挥了明显的改善作用,嘉兴市范围内水体Ⅴ类和超Ⅴ类水体减少了20%[2];且由于太浦河闸门由常关改为常开的调度,太浦河的水动力条件和水质均更有利于生活、生产和生态用水的要求,保障太湖下游地区浙江省和上海市饮用水水源地向太浦河取水的原水厂工程如期建成,如浙江省嘉善—平湖水源地、上海市金泽水库水源地等. 通过太浦闸常年向下游地区供水,在2006年上海合作组织峰会、2010年上海世博会、2018—2021年四届上海进博会期间提供了富有成效的供水保障;针对流域内突发水污染事件,通过实施“引江济太”供水应急调度,有效处置了2003年黄浦江上游重大突发燃油污染事故、2013年上海金山朱泾突发水污染事件、2017年红旗塘上游突发水污染事件、2014—2017年7次太浦河锑浓度异常事件等[54-55];2018年以来,多次提前防范、及时开启太浦河泵站向下游应急供水,太浦河水源地锑浓度再未出现异常. 实践证明,“引江济太”在应对供水安全风险,改善水生态环境和城乡供水安全保障体系中发挥了重要作用,党中

央、国务院关于太湖流域综合治理的决策是完全正确的[2].

3 讨论

3.1 “引江济太”对太湖防洪风险影响分析

3.1.1 调水期间太湖水位与防洪控制水位对比分析 保障流域防洪安全是首要问题,也是“引江济太”保供水安全实施过程面临的最大问题[2,5]. 统计分析 2002－2021 年 53 次“引江济太”,太湖最低水位 2.80 m,发生在 2011 年;太湖最高水位 3.49 m,发生在 2015 年(图 5). “引江济太”实施后,沿江调水规模明显增加,由湖西入湖水量明显加大[11,13,56-57],给流域防洪带来潜在威胁.

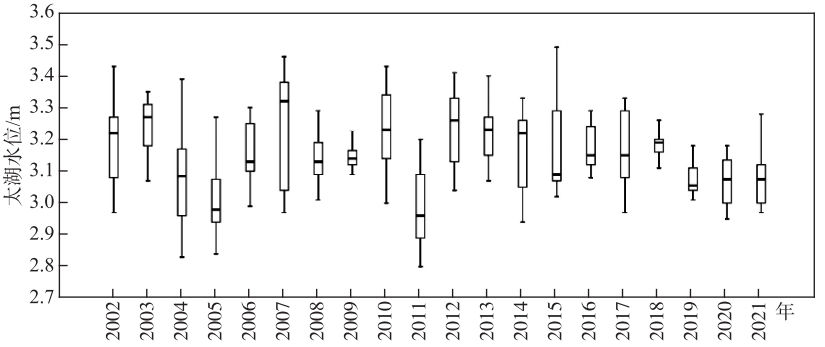


图 5 2002－2021 年“引江济太”期间太湖水位统计

Fig.5 Statistics of Lake Taihu water level during water diversion period from Yangtze River to Lake Taihu, 2002-2021

根据不同调度方案和年度调度计划,53 次“引江济太”期间太湖水位超过防洪控制水位的共有 14 次(图 6),占比为 26%. 其中,属于应急调水的有 4 次(事件编号为 200701、201702、202003、202103);超过防洪控制水位在 0.05 m 内的有 2 次(200601、201401);超过防洪控制水位的天数控制在 5 天以内的有 3 次(200201、200401、201003);超过防洪控制水位的天数控制在 15 天以内的 2 次,为保障省市重大活动(200402、200602);余下的 3 次为根据省市需求实施“引江济太”(200801、200901、201002).

3.1.2 调水期间易发生旱涝急转,统筹协调难度大 太湖流域汛期(5－9 月)受持续降雨、区域洪涝水及下游潮汐顶托影响,太湖水位易涨难消[28,38]. 同时,也是太湖蓝藻水华高发频发、威胁供水安全的季节. 2007 年无锡供水危机事件后,为了加快水体流动,有效抑制蓝藻大规模聚集,保障太湖贡湖湾水源地供水安全,因地方人民政府需求,经商各省市报水利部同意,3 次(200801、200901、201002)临近主汛期实施“引江济太”(图 7),略超防洪控制水位,但持续时间较长. 后期遭强降雨或台风影响,太湖水位迅速上涨,最高水位达 3.82~4.20 m,给流域防汛带来较大压力[58-59].

在低于防洪控制水位的情况下实施的 39 次“引江济太”,调水期间太湖水位较低,但后期叠加强降雨、发生旱涝急转的有 3 次(200502、201101、202002),太湖水位陡涨;后期遭遇强台风 4 次(2007“韦帕”“罗莎”、2012“海葵”、2013“菲特”、2016“莫兰蒂”“鲇鱼”)(图 8). 汛前或汛期实施“引江济太”,发生旱涝急转共 10 次,达 19%,给“引江济太”调度和区域防洪带来了明显挑战[38].

3.1.3 太湖水位逐年趋高,极端气候事件频发,增加“引江济太”的风险 太湖水位变化受流域降雨、城镇化和水利工程调度等多种因素影响,其中降雨是主要影响因子[38,58-59]. 太湖流域降雨的季节性变化特征十分明显,年内降水主要集中在 6－7 月梅雨期和 8－9 月台风期,流域性洪水主要由梅雨暴雨造成,如 1954、1991、1999、2016 和 2020 年流域性洪水或特大洪水. 影响流域的台风 70% 集中在 7 月下旬至 9 月,近 10 年 10 月份、影响太湖流域的台风由 7 年/次增加至 2 年/次[60-61]. 2007 年以来年均入太湖水量较 1986－2006 年增加 30.2×10^8 m^3,其中以湖西区入湖水量增加最为显著[62-63],加上快速城镇化的影响,太湖平均水位呈上升趋势[59,64],2012－2021 年均太湖水位较 2002－2011 年均偏高 0.13 m(图 9). 如春夏,或夏秋实施“引江济

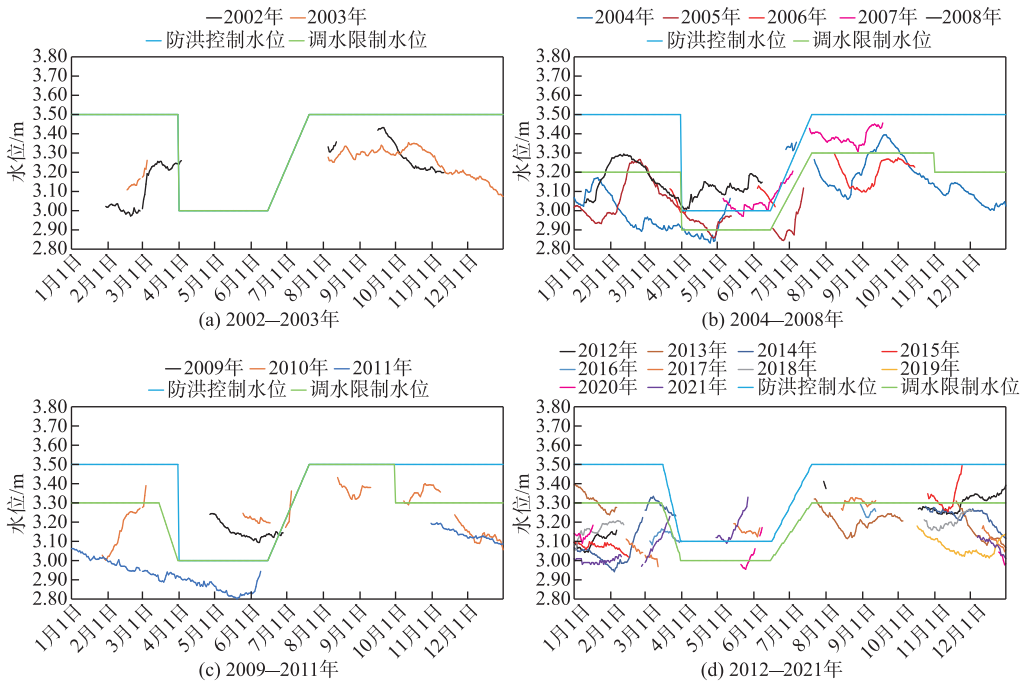


图 6 2002－2021 年“引江济太”期间太湖水位与调度控制水位对比

Fig.6 Comparison between Lake Taihu water level and dispatching control level duing water diversion period from Yangtze River to Lake Taihu, 2002-2021

太”,则前期遭遇梅雨,或后期遭遇台风的几率显著增加,调水风险陡增.

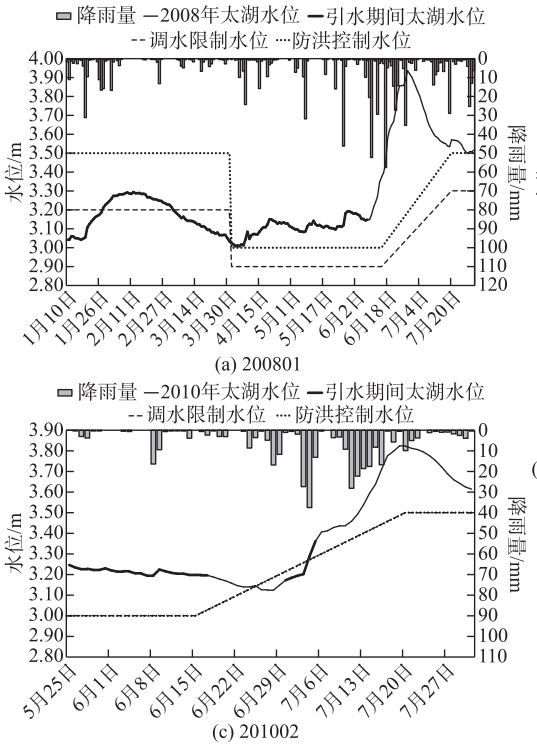
3.2 “引江济太”对太湖供水安全保障能力影响分析

3.2.1 望虞河入湖水量和比例下降 2002－2021 年,通过望虞河常熟水利枢纽共引长江优质水源 327.3×10^8 m^3,通过望亭水利枢纽引水入太湖 151.0×10^8 m^3,相当于 3.4 倍太湖多年平均蓄水量;其中,2011 年引江水量与入湖水量最大,分别为 29.9×10^8 和 16.2×10^8 m^3;年均引江水量 16.4×10^8 m^3,年均入湖水量 7.5×10^8 m^3;入湖比例(望亭入湖水量占同期环太湖入湖总量的百分比,下同)均值为 7%,2011 年入湖比例最高,为 15%(图 10).

2002－2021 年“引江济太”期间,望虞河入湖比例均值在 20% 左右,2007 年第 1 阶段(5 月 6 日－7 月 4 日)入湖比例最高,为 44%(图 11),大量优质长江水被引入太湖,有效缓解了无锡供水危机事件[25]. 入湖效率(望亭入湖水量占同期常熟引水量的百分比,下同)均值在 50% 左右,2013 年第 2 阶段(7 月 22 日－10 月 5 日)入湖效率最高,为 71%(图 12),2013 年流域出梅后持续高温少雨,太湖水位始终维持在 3.10 m 以上(图 3),为周边地区用水创造了有利条件[27].

3.2.2 望虞河入湖主要水质调度指标持续好转 2002－2021 年“引江济太”期间,望虞河入湖水质调度指标总磷和高锰酸盐指数平均浓度均优于Ⅲ类,2020 年开始优于Ⅱ类(图 13). 保持望虞河优质水入太湖始终是“引江济太”的主要目标之一,通过联合调控望虞河两岸工程,减少东岸分流,抬高望虞河沿线水位,有效避免西岸沿线劣质水汇入望虞河,从而维持入湖水量水质效果. 随着长江经济带国家战略、河湖长制的有效实施,长江来水和望虞河沿线水质均有所好转,特别是 2020 年望虞河西岸口门实现控制后,通过科学调度,望虞河入湖水质进一步好转.

3.2.3 对比其他环湖主要口门,望虞河水质较优、水量可控 以环太湖浙西区、湖西区入湖与“引江济太”望虞河入湖水量、入湖水质对比可知,作为“引江济太”主体的望虞河入湖与天然入流中水质最好的浙西区入湖水量相当. 总磷、总氮等指标明显优于湖西区入湖河流,2020 年开始已优于浙西山丘区苕溪,成为入湖水



事件编号(月-日—月-日)	望亭入湖水量/($\times10^8$ m^3)	超过防洪控制水位最大幅度/m	历时/d	后期遭遇梅雨时间段(月-日—月-日)	后期遭遇台风
200801(1-10—6-8)	8.9	0.19	69	6-7—7-3	海鸥 凤凰 莫拉克
200901(4-27—6-28)	4.9	0.24	59	6-20—7-7	
201002(5-25—6-17)	1.3	0.25	24	6-17—7-16	—

图 7 超过防洪控制水位情况下实施“引江济太”的太湖水位与降雨量统计

Fig.7 Statistics of water level and rainfall of Lake Taihu when the level exceeding flood control level

质最好的河流之一,印证了“引江济太”并非是引起太湖总磷反弹的动因[65-66].

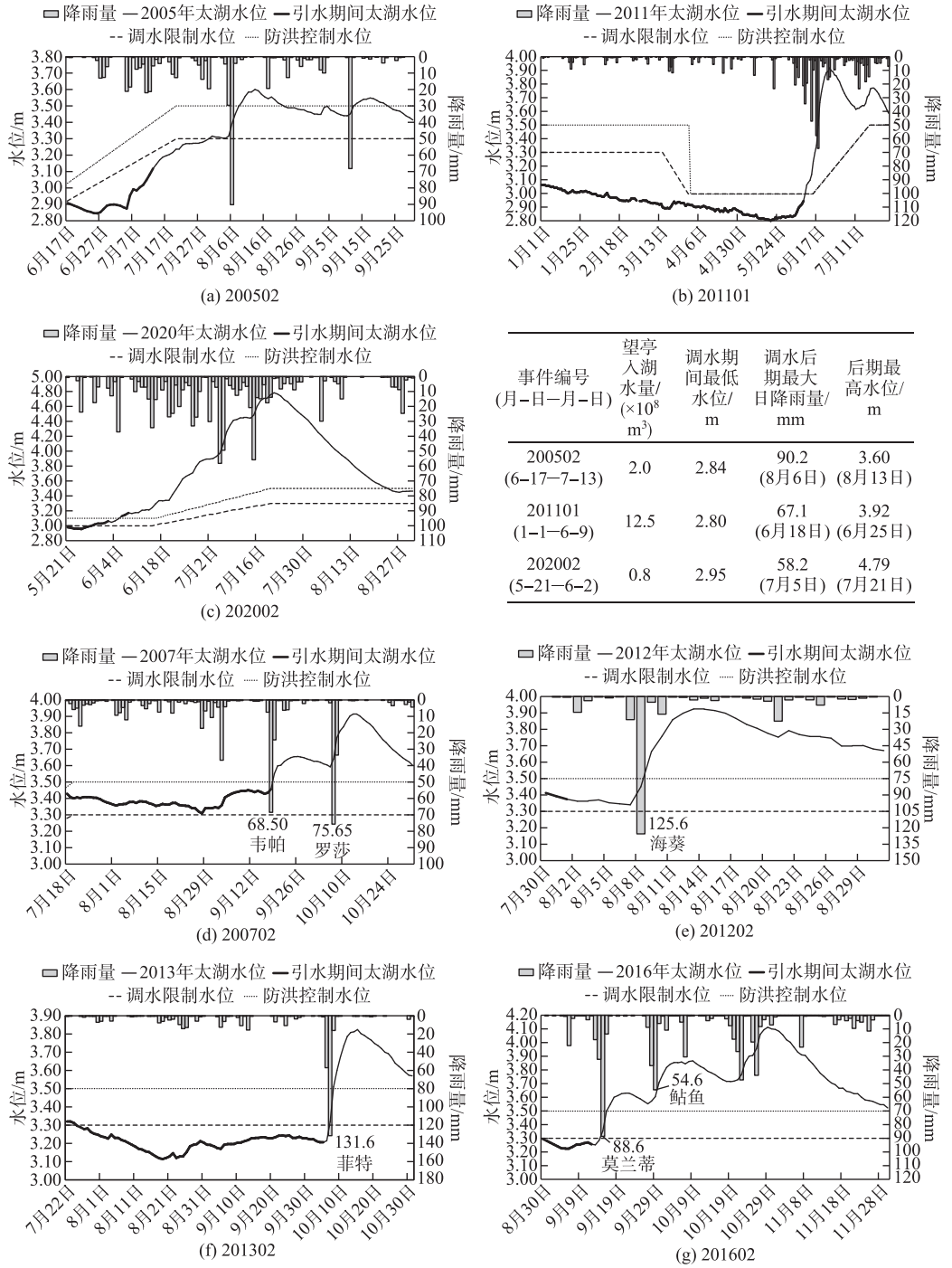
湖西区入湖水量占环太湖入湖总水量的比例约 70%,且入湖比例呈增长趋势(图 14),虽然入湖河道水质有明显改善但仍然相对较差(图 15),来水量大、水质差致使湖西区入湖污染量约占环湖入湖污染物总量的 80%以上,与相关学者的计算结果接近[67-68],是造成入湖污染负荷不降反升的主要动因[13,69-70].

3.3 “引江济太”调水事件总体评定

3.3.1 *主成分分析* 通过 SPSS 主成分分析得到旋转成分矩阵(表 2),第 1 公因子在“是否汛期、春夏秋冬、蓝藻环境、是否应急”有较大载荷系数,可定义为“生境风险因子”;第 2 公因子在“望虞河入湖比例、望虞河入湖效率、是否跨季、水资源增加”有较大载荷系数,定义为“引水效果因子”;第 3 个公因子在“入湖高锰酸盐指数达标率、科学试验、入湖总磷达标率”有较大载荷系数,定义为“水质改善因子”;第 4 个公因子在“超过防洪控制水位、太浦河供水比例”有较大载荷系数,定义为“供水保障因子”;第 5 个公因子在“重大活动”有较大载荷系数,定义为“社会评价因子”.

3.3.2 *综合评估* 计算得出每个主成分特征向量系数,构建得到 1~5 因子的得分函数,根据 5 个因子的权重得分,计算得到 53 次调水事件的综合得分,并进行排序后选取得分前 10 名的调水事件(图 16).

根据分析结果可知,调水事件 200701、200702 综合得分位列前 3 名,有效缓解了无锡市供水危机;200302 得分位列第 2 名,正是促进了扩大调水试验;202002 得分位列第 5 名,缓解了太湖贡湖和梅梁湖等湖区出现较大面积蓝藻水华,入湖水质首次达到Ⅱ类,对新阶段高质量保障太湖安全度夏具有重要意义. 由图 16 可知,有些调水事件引水效果得分不高,例如,201202 为缓解 7 月中下旬蓝藻暴发,启动“引江济太”后有台风影响流域,引水历时 3 天,引水效果仅得分为-1.35;202003 为缓解 6 月上旬太湖贡湖北部沿岸黑色异常水体,“引江济太”期间严格控制太湖水位不超过 3.15 m,考虑到梅雨期引水历时 3 天,引水效果仅得分为-1.59. “引江济太”实际调度需要统筹多目标需求,持续实施效果更好,今后评估方法要进一步考虑应急需求.



事件编号(月–日—月–日)	望亭入湖水量/($\times10^8$ m^3)	调水期间最低水位/m	调水后期最大日降雨量/mm	后期最高水位/m
200502 (6–17—7–13)	2.0	2.84	90.2 (8月6日)	3.60 (8月13日)
201101 (1–1—6–9)	12.5	2.80	67.1 (6月18日)	3.92 (6月25日)
202002 (5–21—6–2)	0.8	2.95	58.2 (7月5日)	4.79 (7月21日)

图 8 低于防洪控制水位情况下实施“引江济太”的太湖水位与降雨量统计

Fig.8 Statistics of water level and rainfall of Lake Taihu when the level below flood control level

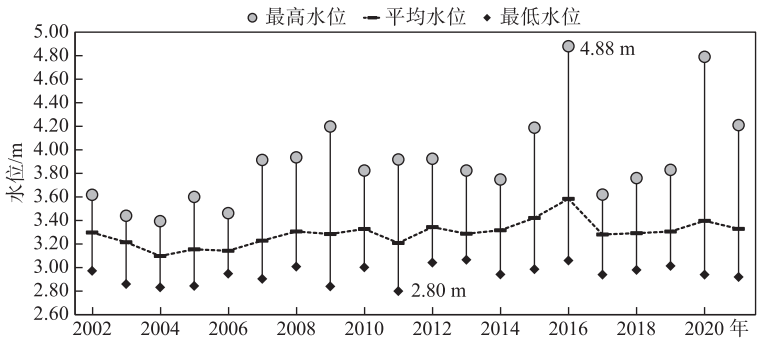


图 9 年度太湖水位变化趋势

Fig.9 The variation trend of annual Lake Taihu water level

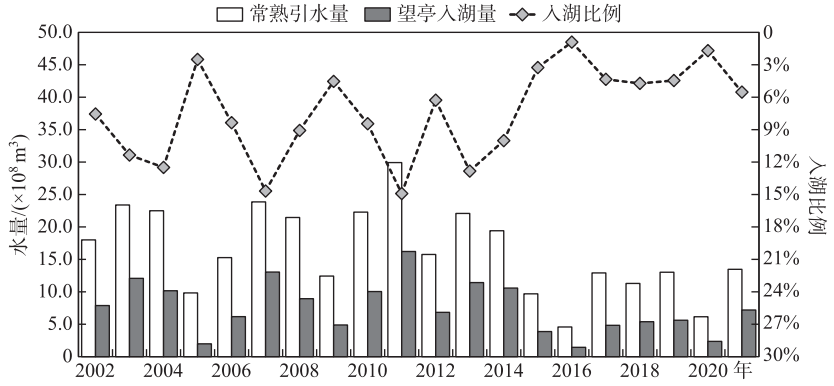


图 10 年度望虞河引江入湖水量变化趋势

Fig.10 The variation trend of annual water quatity of Wangyu River-Lake Taihu

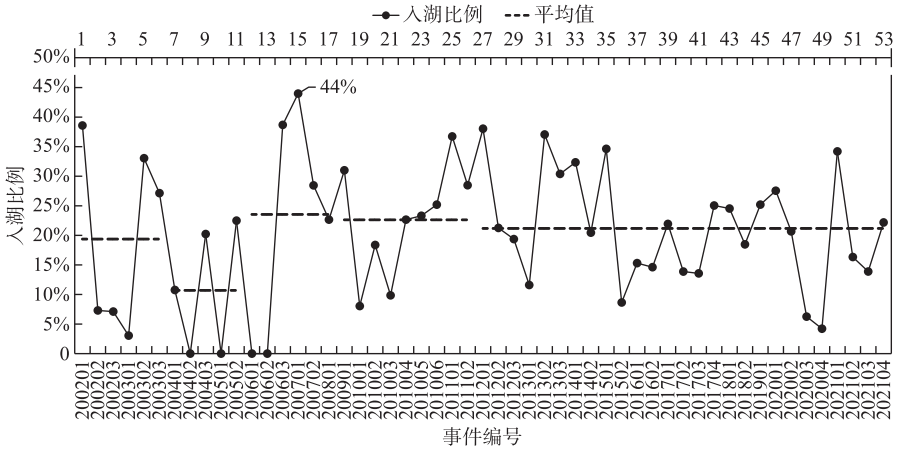


图 11 “引江济太”期间望虞河入湖比例变化趋势

Fig.11 The variation trend of proportion of Wangyu River-Lake Taihu during water diversion period

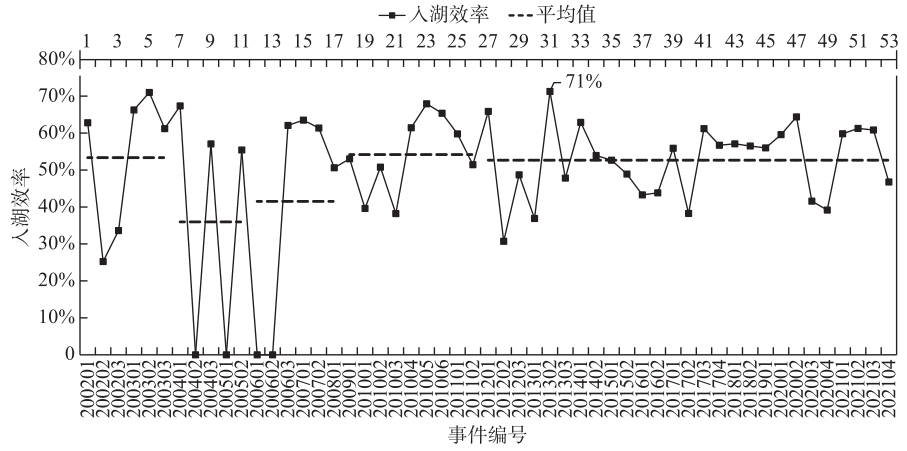


图 12 “引江济太”期间望虞河入湖效率变化趋势

Fig.12 The variation trend of efficiency of Wangyu River-Lake Taihu during water diversion period

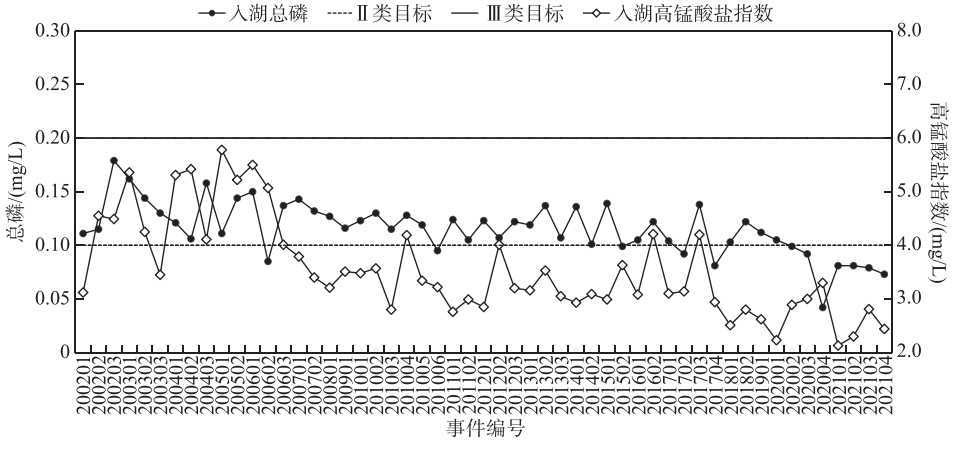


图 13 “引江济太”期间望虞河入湖水质变化趋势

Fig.13 The variation trend of average quality of Wangyu River-Lake Taihu during water diversion period

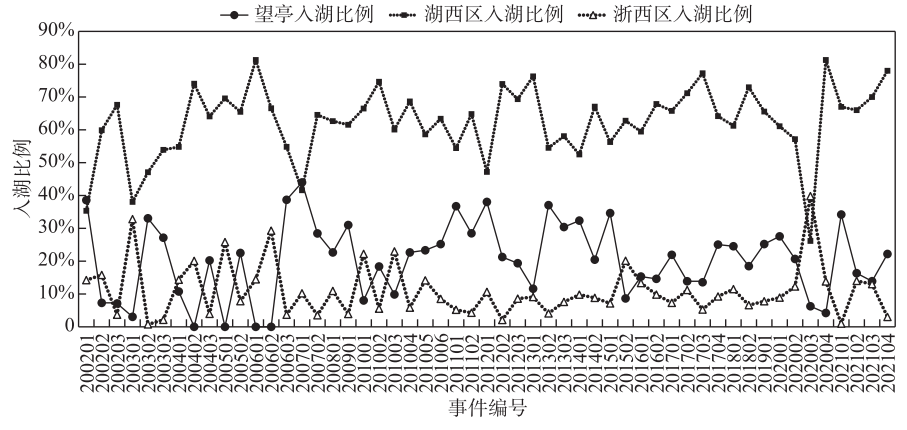


图 14 “引江济太”期间环太湖不同分区入湖比例变化

Fig.14 The variation trend of proportion of different areas around Lake Taihu during water diversion period

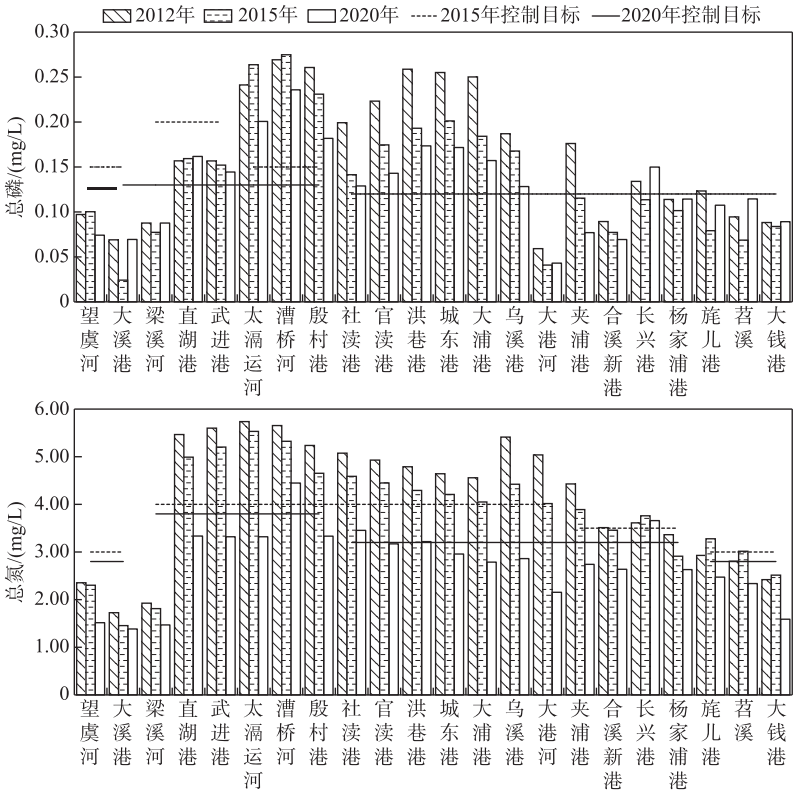


图 15 主要入太湖河流控制断面总磷和总氮水质指标浓度

Fig.15 The total phosphorus and total nitrogen of water quality indexes concentration in control sections of major rivers entering Lake Taihu

表 2 旋转后的主成分矩阵

Tab.2 The rotated principal component matrix

成分	1	2	3	4	5
Zscore(是否汛期)	0.827	0.041	−0.195	−0.157	−0.241
Zscore(春夏秋冬)	−0.812	0.053	0.084	0.281	0.240
Zscore(蓝藻环境)	0.752	−0.031	−0.389	−0.085	0.105
Zscore(是否应急)	0.699	−0.048	0.249	−0.035	0.291
Zscore(望虞河入湖比例)	0.043	0.809	0.301	0.152	0.158
Zscore(望虞河入湖效率)	0.065	0.765	0.247	0.307	0.104
Zscore(是否跨季)	−0.046	0.642	−0.213	−0.284	0.035
Zscore(水资源增加)	−0.422	0.581	0.037	0.188	−0.112
Zscore(入湖高锰酸盐指数达标率)	−0.165	0.331	0.834	0.128	0.108
Zscore(科学试验)	0.006	−0.219	−0.766	0.129	0.067
Zscore(入湖总磷达标率)	−0.177	−0.416	0.733	−0.060	0.009
Zscore(超过防洪控制水位)	0.154	−0.123	−0.011	−0.856	0.080
Zscore(太浦河供水比例)	−0.264	0.070	−0.113	0.846	0.149
Zscore(重大活动)	0.054	−0.128	0.016	−0.031	−0.922

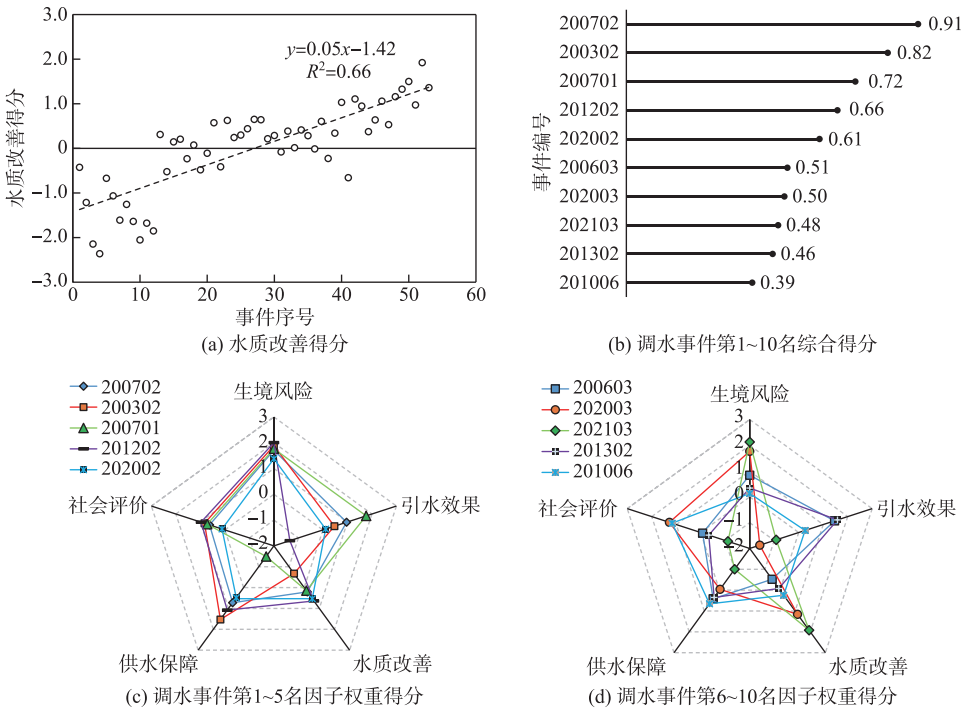


图 16 53 次“引江济太”调水事件综合得分统计分析

Fig.16 Statistical analysis of comprehensive scores of 53 water diversion events from Yangtze River to Lake Taihu

3.3.3 藤原效应　望虞河引长江水入湖,增加太湖水资源量和水环境容量,改善太湖及区域水环境发挥了积极的作用[2,18,71],通过与其他工程联合运用,可以加快太湖水体循环,减小水龄,改善水环境[6,13,72]. 研究表明,根据现行调度方案实施望虞河“引江济太”的机会相对减少,2015 年以来通过望虞河入湖水量平均为 4.4×10^8 m^3(图 10),与《太湖流域水量分配方案》流域水资源配置格局中望虞河入湖水量差异显著(多年平均降水条件下,2020 年平水年望亭水利枢纽入湖 15.6×10^8 m^3)[73],湖西引水入湖已经成为太湖水量的主源[11,13,62,74]. 湖西区与望虞河引水入湖对于太湖水位的影响,类似双台风的“藤原效应”[75]. 除去台风、低水位叠加强降雨后的 32 次“引江济太”,基本处于夏末、秋冬季(图 17a),期间太湖水位呈下降趋势的有 18 次、呈上涨趋势的有 14 次(图 17b),其中望虞河引水入湖并不能扭转太湖水位下降趋势,上涨主要是由降雨和湖西入湖增加所致[13,62].

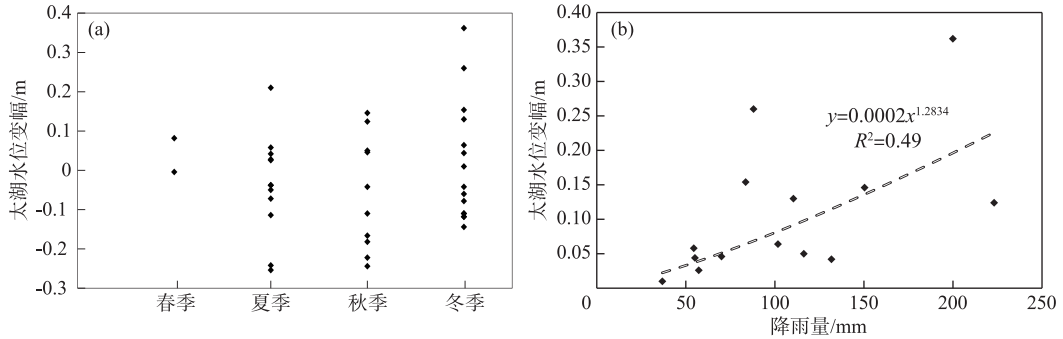


图 17 “引江济太”期间太湖水位变幅对比统计情况

Fig.17 The variation range statistics of Lake Taihu water level during water diversion period

目前,太湖流域产业结构正在调整,污染排放总量依然超过环境容量[10-11],总磷、总氮已成为制约水质改善的最大短板,如遇合适的水文气象条件,太湖暴发大面积蓝藻,甚至引发湖泛的可能性依然存在[11,40].新孟河工程今后投入运用,流域引排水格局将继续发生重大变化,对于湖西区的影响更为明显,亟需着力破解因入湖水量增加而引起的入湖污染负荷居高不下的问题. 太湖流域综合治理进入了新阶段,要密切关注流域供用水形势和太湖等重要水源地水质,特别是太湖蓝藻发生发展态势,按照《太湖流域水环境综合治理总体方案》要求,统筹多目标需求,通过望虞河、新孟河两条骨干河道科学调引长江水,优化沿江引排格局,促进河湖水体的有序流动,提高太湖水资源承载能力和水环境容量,保障流域重要饮用水水源地供水安全和太湖安全度夏[37,49,76].

4 结论与展望

1)经过 20 年流域综合治理,太湖湖体水质提升两个多类别,22 条主要入太湖河道全面消除劣 V 类,取得了显著成效. 20 年的实践证明,“引江济太”从无到有、从试验到长效运行,对促进人与自然的和谐、流域经济社会的可持续发展,是行之有效的办法和途径. 但也要清醒地看到,20 年来流域经济总量增加 8 倍多、人口增加 3000 多万,经济社会快速发展已经超出了流域水资源水环境水生态承载能力,流域内水灾害、水资源、水生态、水环境等新老水问题交织,太湖治理依然任重道远. 要继续以“减磷控氮”为主线,建立并严格实施入湖河道控制断面污染物浓度和总量双控考核制度,严控入太湖污染物总量,逐步实现入湖污染物总量与太湖水环境容量动态平衡.

2)保障太湖流域水安全与工程调度密切相关,要在多目标统筹协调调度机制下,继续深化完善“引江济太”调度机制,从流域整体出发,正确处理流域与区域、汛期与非汛期、水量与水质、防洪与供水、水生态、水环境的关系,统筹考虑太湖防洪保安、供水保障、蓝藻防控、水草生长等多目标,协调省市间、部门间、上下游等不同调度需求,有针对性地解决水问题,依法、科学、精细调度水利工程群,促进河网有序流动和入湖水质持续向好,保障太湖及区域水源地供水安全.

3)围绕强化科技引领,深入分析调水案例,做好调水原型试验,构建高保真水动力学数字孪生模型,强化调水全过程监测、预报、预警、预演,着力破解综合调度关键难题. “引江济太”作为流域治理管理的一项重要举措,焦点是太湖水位. 加快做好太湖流域洪水与水量调度方案修订,研究优化分阶段、分水位、分区域的太湖调度预期目标水位,为强化流域统一规划、统一治理、统一调度、统一管理提供有力支撑.

5 参考文献

[1] Zhang GF, Feng XL, Yue QT eds. Study on the change and social impact of population and ecological environment in Taihu Lake Basin (1851-2005). Shanghai: Fudan Press, 2014. [张根福, 冯贤亮, 岳钦韬. 太湖流域人口与生态环境的变迁及社会影响研究: 1851-2005. 上海: 复旦大学出版社, 2014.]

[2] Wu HY, Lin HJ eds. Experiment of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake. Beijing: China Water and Power Press, 2010. [吴浩云, 林荷娟. 引江济太调水试验. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.]

[3] The State Council. The tenth five-year plan for prevention and control of water pollution in Taihu Lake, 2001. [国务院. 太湖水污染防治“十五”计划, 2001.]

[4] Huang WY, Yang GS, Xu PZ. Environmental effects of “zero” actions in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2002, **14**(1): 67-71. DOI: 10.18307/2002.0110. [黄文钰, 杨桂山, 许朋柱. 太湖流域“零点”行动的环境效果分析. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 67-71.]

[5] Liu CS, Wu HY. Theory and implement of water transfer test for Yangtze River to Taihu Lake water transfer project. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003, **34**(1): 4-8. [刘春生, 吴浩云. 引江济太调水试验的理论和实践探索. 水利水电技术, 2003, **34**(1): 4-8.]

[6] Wu HY, Lin HJ, Dai S eds. Study on key technology of the experiment of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake. Beijing: China Water and Power Press, 2010. [吴浩云, 林荷娟, 戴甦. 引江济太调水试验关键技术研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.]

[7] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al*. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI: 10.18307/2021.0401. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近 70

年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]

[8] Liu N. A preliminary exploitation of experiment project of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake. *China Water Resources*, 2004, (2): 36-38. [刘宁. 对引江济太调水试验工程的初步认识和探讨. 中国水利, 2004, (2): 36-38.]

[9] Hu HP, Tian FQ. Understanding of the experiment of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake. *China Water Resources*, 2004, (10): 12-13. [胡和平, 田富强. 对引江济太调水试验的认识. 中国水利, 2004, (10): 12-13.]

[10] Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources ed. General plan for comprehensive treatment of the Taihu Basin. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 1987. [水利部太湖流域管理局. 太湖流域综合治理总体规划方案. 上海: 水利部太湖流域管理局, 1987.]

[11] Wu HY, Jia GH, Xu B *et al*. Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980-2020. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 974-991. DOI: 10.18307/2021.0402. [吴浩云, 贾更华, 徐彬等. 1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 974-991.]

[12] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al*. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI: 10.18307/2016.0502. [戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015 年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]

[13] Zhu W, Cheng L, Xue ZP *et al*. Changes of water exchange cycle in Lake Taihu(1986-2018) and its effect on the spatial pattern of water quality. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1087-1099. DOI: 10.18307/2021.0411. [朱伟, 程林, 薛宗璞等. 太湖水体交换周期变化(1986－2018 年)及对水质空间格局的影响. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1087-1099.]

[14] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(3): 277-290. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52**(3): 277-290.]

[15] Wu HY, Hu Y. Maintaining healthy rivers and lakes through water diversion from Yangtze River to Taihu Lake in Taihu Basin. *Water Science and Engineering*, 2008, **1**(3): 36-43.

[16] Yang GS, Wang JD *et al* eds. Economic development, water environment, water disaster in Taihu Basin. Beijing: Science Press, 2003. [杨桂山, 王建德等. 太湖流域经济发展·水环境·水灾害. 北京: 科学出版社, 2003.]

[17] Li XH, Hu WP, Zhai SH *et al*. Effect of water transfer from Yangtze River on alkaline phosphatase activity in Taihu Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, **36**(4): 478-483. [李香华, 胡维平, 翟淑华等. 引江济太对太湖水体碱性磷酸酶活性的影响. 水利学报, 2005, **36**(4): 478-483.]

[18] Wu HY, Zhou DP, He J *et al*. Integrated benefit assessment of the project water diversion from Yangtze River to Lake Taihu and discussion on the methodology. *J Lake Sci*, 2008, **20**(5): 639-647. DOI: 10.18307/2008.0513. [吴浩云, 周丹平, 何佳等. 引江济太工程综合效益的评估及方法探讨. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 639-647.]

[19] Wu HY, Diao XD, Zeng SX. Analysis of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake: Case study in Huzhou City. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(6): 888-892. [吴浩云, 刁训娣, 曾赛星. 引江济太调水经济效益分析——以湖州市为例. 水科学进展, 2008, **19**(6): 888-892.]

[20] Wu HY, Hu Y. Influences of water diversion from Yangtze River to Taihu Basin on water environment of the upper Huangpujiang River. *Journal of Hehai University: Natural Sciences*, 2005, **33**(2): 144-147. [吴浩云, 胡艳. 引江济太调水试验工程对黄浦江上游水环境的影响分析. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, **33**(2): 144-147.]

[21] Liu SQ, Tian H, Hu L. Experimental study on water diversion from Taipu River and its effect on water quality of drinking water sources of the Huangpu River upstream reach. *Water Resources Protection*, 2009, **25**(4): 40-43. [刘水芹, 田华, 胡岚. 太浦河调水对黄浦江上游水源地水质影响的试验. 水资源保护, 2009, **25**(4): 40-43.]

[22] Wu HY, Zhu LZ. Influence of the discharge of the Taipu River on water quality in the lower water source area. *Water Resources Protection*, 2008, **24**(3): 42-45. [吴浩云, 朱灵芝. 太浦河流量对下游水源地水质的影响. 水资源保护, 2008, **24**(3): 42-45.]

[23] Wu HY, Sun JH, Yan ZJ *et al*. Considerations on long-term operation of Yangtze-Taihu water diversion. *China Water Resources*, 2008, (1): 9-11. [吴浩云, 孙金华, 颜志俊等. 引江济太长效运行的思考. 中国水利, 2008, (1): 9-11.]

[24] Xu H, Zhang Y, Jin K *et al*. Emergency water diversion from Yangtze to Taihu Lake for secure water supply during cut off of Qingcaosha water source system in Shanghai. *China Water Resources*, 2012, (9): 31-33. [徐洪, 张怡, 金科等. 引江济太应急调水保障上海市青草沙原水系统切换期间供水安全. 中国水利, 2012, (9): 31-33.]

[25] Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Jiangsu Provincial Water Resources Department, Environmental Protection Department of Jiangsu Province. Analysis on the effect of improving water quality of Taihu Lake water source by emergency water diversion from Yangtze River to Taihu Lake. *China Water Resources* , 2007, (17): 1-2, 11. [水利部太

湖流域管理局, 江苏省水利厅, 江苏省环境保护厅. 引江济太应急调水改善太湖水源地水质效果分析. 中国水利, 2007, (17): 1-2, 11.]

[26] Xu H, Jin K, Zhang Y *et al*. Practice of ensuring water supply safety of "World Expo" by diversion from Yangtze River to Taihu Lake. *China Flood & Drought Management*, 2013, **23**(2): 5-6, 48. [徐洪, 金科, 张怡等. 引江济太保障"世博会"供水安全的实践. 中国防汛抗旱, 2013, **23**(2): 5-6, 48.]

[27] Mei Q, Feng DW. Functional analysis on water diversion from Yangtze River to Taihu Lake for securing water supply. *China Water Resources*, 2015, (21): 24-27. [梅青, 冯大蔚. 引江济太对保障太湖流域供水安全的作用分析. 中国水利, 2015, (21): 24-27.]

[28] Wu HY, Sun HT. Formulation and understanding of flood and water regulation scheme in Taihu Basin. *China Flood & Drought Management*, 2012, **22**(2): 5-7. [吴浩云, 孙海涛. 太湖流域洪水与水量调度方案的制定和认识. 中国防汛抗旱, 2012, **22**(2): 5-7.]

[29] Mei Q, Feng DW, Li P. Strengthening risk awareness, strengthening dispatching management and ensuring "Three Security" in Taihu Basin. *China Flood & Drought Management*, 2018, **28**(1): 36-38. [梅青, 冯大蔚, 李鹏. 强化风险意识 加强调度管理 保障太湖流域"三个安全". 中国防汛抗旱, 2018, **28**(1): 36-38.]

[30] Wu HY, Huang ZX. Thoughts on addressing inadequacies and strengthening supervision supported by Intelligent Taihu Lake. *Water Resources Informatization*, 2019, (2): 1-6, 10. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2019.02.001. [吴浩云, 黄志兴. 以智慧太湖支撑水利补短板强监管的思考. 水利信息化, 2019, (2): 1-6, 10.]

[31] Dai S, Zhang M. Overall objective and construction key content of Smart Taihu Lake. *Water Resources Informatization*, 2018, (4): 7-10, 37. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2018.04.002. [戴甦, 张敏. 智慧太湖建设总体目标与关键内容. 水利信息化, 2018, (4): 7-10, 37.]

[32] Pay attention to the integration of Yangtze River Delta: Establish an information sharing platform for comprehensive water environment management in Taihu Lake Basin. Sina.com, 2020. [关注长三角一体化:建立太湖流域水环境综合治理信息共享平台. 新浪网, 2020.]

[33] Mei Q, Zhang HH. Flood control and water resources regulation in Taihu Lake Basin: Practice and thought. *China Water Resources*, 2015, (9): 19-21, 27. [梅青, 章杭惠. 太湖流域防洪与水资源调度实践与思考. 中国水利, 2015, (9): 19-21, 27.]

[34] Wu HY, Tang L, Qin Z *et al*. Construction of the beautiful and happy Taihu Lake under the control of ecological flow of key rivers and lakes. *China Water Resources*, 2019, (20): 4-6, 10. [吴浩云, 唐力, 秦忠等. 重点河湖生态流量管控下的美丽幸福太湖流域片建设. 中国水利, 2019, (20): 4-6, 10.]

[35] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al*. Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 9-21. DOI: 10.18307/2017.0102. [王冼民, 翟淑华, 张红举等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 9-21.]

[36] Gao Y, Mao XW, Xu WD. Analysis of the influence on the Taihu Lake and the area around: Diversion from the Yangtze River to the Taihu Lake. *Journal of China Hydrology*, 2006, **26**(1): 92-94. [高怡, 毛新伟, 徐卫东. "引江济太"工程对太湖及周边地区的影响分析. 水文, 2006, **26**(1): 92-94.]

[37] Yan JJ. Impact on regional industrial structure and economy by the project of basin water transfer [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. [严景军. 流域调水工程项目对区域产业结构与经济影响研究[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.]

[38] Jin K, Wang XJ, Chen T. Analysis on the impacts of rainfall and Yangtze-Taihu water diversion on the water level variation in Taihu Lake. *Journal of China Hydrology*, 2020, **40**(6): 63-67. [金科, 王雪姣, 陈甜. 降雨及引江济太调度对太湖水位变化的影响分析. 水文, 2020, **40**(6): 63-67.]

[39] Zhu X, Li GB, Wang SR. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(6): 106-111. [朱喜, 李贵宝, 王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理. 水资源保护, 2020, **36**(6): 106-111.]

[40] Shi XL, Yang JS, Chen KN *et al*. Review on the control and mitigation strategies of lake cyanobacterial blooms. *J Lake Sci*, 2022, **34**(2): 349-375. DOI: 10.18307/2022.0201. [史小丽, 杨瑾晟, 陈开宁等. 湖泊蓝藻水华防控方法综述. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 349-375.]

[41] Lu GH, Zhang JH. Present status and problems of comprehensive treatment of water environment in Taihu Lake and countermeasures. *Water Resources Protection*, 2014, **30**(2): 67-69, 94. [陆桂华, 张建华. 太湖水环境综合治理的现状、问题及对策. 水资源保护, 2014, **30**(2): 67-69, 94.]

[42] Lv ZL. Practice and thoughts on comprehensive treatment of water pollution in Taihu Lake. *Journal of Hohai University*:

Natural Sciences, 2012, **40**(2): 123-128. [吕振霖. 太湖水环境综合治理的实践与思考. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(2): 123-128.]

[43] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al*. Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]

[44] Cao XH, Zhou E. Influence of water diversion of Wangyu River on water environment of west Changshu City. *Water Resources Protection*, 2006, **22**(6): 47-50. [曹雪华, 周锷. 望虞河引水对常熟市西岸地区水环境的影响. 水资源保护, 2006, **22**(6): 47-50.]

[45] Xu LY, Pang Y, Fu H. Study of diversion backwater conditions for ensuring water quality of Wangyu River during water diversion period. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(3): 121-126. [徐凌云, 逄勇, 付浩. 保障望虞河引调水期水质的引水顶托条件研究. 水资源保护, 2016, **32**(3): 121-126.]

[46] Hao WB, Tang CY, Hua L *et al*. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, **40**(2): 129-133. [郝文彬, 唐春燕, 滑磊等. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(2): 129-133.]

[47] Jin K, Qian AR, Zhang H. Practices and considerations to flood regulation in the Taihu Basin in 2021. *China Water Resources*, 2022, (9): 11-12, 29. [金科, 钱傲然, 张昊. 2021 年太湖流域洪水调度实践与思考. 中国水利, 2022, (9): 11-12, 29.]

[48] Wu HY. Coupling simulation and conjunctive operation of water quantity and quality for large scale river and lake network [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2006. [吴浩云. 大型平原河网地区水量水质耦合模拟及联合调度研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2006.]

[49] Cui GB, Liu L, Yao Q eds. Control mechanism of eutrophication in Taihu Lake Basin. Beijing: China Water Power Press, 2009. [崔广柏, 刘凌, 姚琪. 太湖流域富营养化控制机理研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.]

[50] Jia GH, Dai JJ, Wu YN *et al*. Key issues related to Taihu regulation and protection under new development stage. *China Water Resources*, 2021, (5): 24-27. [贾更华, 戴晶晶, 吴亚男等. 新发展阶段太湖治理与保护关键问题探讨. 中国水利, 2021, (5): 24-27.]

[51] Sun JC. On the water problem in Taihu Basin and countermeasures. *J Lake Sci*, 2005, **17**(4): 289-293. DOI: 10.18307/2005.0401. [孙继昌. 太湖流域水问题及对策探讨. 湖泊科学, 2005, **17**(4): 289-293.]

[52] Zhai SH. Analysis of management practice of Taihu Lake Basin in the development of the Yangtze River economic zone. *Technology and Economy of Changjiang*, 2020, **4**(4): 31-34. [翟淑华. 长江经济带发展中太湖流域治理实践分析. 长江技术经济, 2020, **4**(4): 31-34.]

[53] Zhan YX, Ji YH, Shen L. Analysis on the role of water transfer to the comprehensive environment management in the Taihu Lake. *China Water Resources*, 2010, (4): 53-55. [展永兴, 季轶华, 沈利. 调水引流在太湖水环境综合治理中的作用分析. 中国水利, 2010, (4): 53-55.]

[54] Zhu HF. Distribution and control countermeasures for antimony in water source of Huangpu River upper stream. *Water Purification Technology*, 2018, **37**(5): 25-32. [朱慧峰. 黄浦江上游水源中锑的分布与处置对策. 净水技术, 2018, **37**(5): 25-32.]

[55] Lin HJ, Gan YY, Liu M. Analysis on early-warning indexes for antimony concentration anomaly in Taipu River. *Journal of China Hydrology*, 2021, **41**(1): 95-101. [林荷娟, 甘月云, 刘敏. 太浦河锑浓度异常预警指标研究. 水文, 2021, **41**(1): 95-101.]

[56] Wu YK, Tao YG, Wang HY. Influence of “Diverting Changjiang River water into Taihu Lake” engineering to Zhejiang. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2007, **35**(6): 13-15, 18. [伍远康, 陶永格, 王红英. “引江济太”工程对浙江的影响分析. 浙江水利科技, 2007, **35**(6): 13-15, 18.]

[57] Cheng XT, Wu HY eds. Flood risk scenario analysis method and practice. Beijing: China Water Power Press, 2019. [程晓陶, 吴浩云. 洪水风险情景分析方法与实践: 以太湖流域为例. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.]

[58] Wu HY, Wang YT, Hu QF *et al*. Flood identification and constraints analysis for flood resources utilization in Taihu Lake Basin. *Hydro-Science and Engineering*, 2016, (5): 1-8. [吴浩云, 王银堂, 胡庆芳等. 太湖流域洪水识别与洪水资源利用约束分析. 水利水运工程学报, 2016, (5): 1-8.]

[59] Wang LZ, Hu QF, Hu Y *et al*. Changes and cause analysis of water level characteristic factors in Taihu Lake during period from 1954 to 2013. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2016, **44**(1): 13-19. [王磊之, 胡庆芳, 胡艳等.

1954－2013 年太湖水位特征要素变化及成因分析. 河海大学学报: 自然科学版, 2016, **44**(1): 13-19.]

[60] Wang YT, Wu HY, Hu QF eds. Theory and practice of flood resources utilization in Taihu Lake Basin. Beijing: Science Press, 2015. [王银堂, 吴浩云, 胡庆芳. 太湖流域洪水资源利用理论与实践. 北京: 科学出版社, 2015.]

[61] Wu J, Liang P, Lin HJ *et al*. Meiyu determination and causes of typical abnormal Meiyu years in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 255-265. DOI: 10.18307/2021.0118. [吴娟, 梁萍, 林荷娟等. 太湖流域梅雨的划分及其典型年异常成因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 255-265.]

[62] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986－2017 年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]

[63] Ma Q, Liu JJ, Gao MY. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998-2007. *J Lake Sci*, 2010, **22**(1): 29-34. DOI: 10.18307/2010.0104. [马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998－2007 年). 湖泊科学, 2010, **22**(1): 29-34.]

[64] Chang XY, Cai Y, Ke CQ. Monitoring of water level variation in Tai Lake from 2002-2018 based on satellite altimeter data. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 1295-1308. [常翔宇, 蔡宇, 柯长青. 基于卫星测高数据的 2002－2018 年太湖水位变化监测. 中国环境科学, 2022, **42**(3): 1295-1308.]

[65] Zhu W, Xue ZP, Zhang YM *et al*. Effect of water diversion from the Yangtze River to Lake Taihu on total phosphorus rebound after 2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1432-1445. DOI: 10.18307/2020.0518. [朱伟, 薛宗璞, 章元明等. "引江济太"对 2016 年后太湖总磷反弹的直接影响分析. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1432-1445.]

[66] Chen W, Liu W, Sun W. The integrated development of Taihu Basin and the Yangtze River Delta region: Status, challenges and strategies. *J Lake Sci*, 2021, **33**(2): 327-335. DOI: 10.18307/2021.0201. [陈雯, 刘伟, 孙伟. 太湖与长三角区域一体化发展: 地位、挑战与对策. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 327-335.]

[67] Wan XL, Ma Q, Dong JG *et al*. Analysis of pollutants in rivers entering Taihu Lake in Jiangsu Province. *Water Resources Protection*, 2012, **28**(3): 38-41. [万晓凌, 马倩, 董家根等. 江苏省入太湖河道污染物分析. 水资源保护, 2012, **28**(3): 38-41.]

[68] Xie AL, Xu F, Xiang L *et al*. Trend analysis for pollutant load of major rivers around Taihu Lake and its impact on water quality in Taihu Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2017, **45**(5): 391-397. [谢艾玲, 徐枫, 向龙等. 环太湖主要入湖河流污染负荷量对太湖水质的影响及趋势分析. 河海大学学报: 自然科学版, 2017, **45**(5): 391-397.]

[69] Lv W, Yang H, Yang JY *et al*. Relationship between water quality in Lake Taihu and pollutant fluxes of the rivers surrounding Lake Taihu in Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1454-1462. DOI: 10.18307/2020.0517. [吕文, 杨惠, 杨金艳等. 环太湖江苏段入湖河道污染物通量与湖区水质的响应关系. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1454-1462.]

[70] Lin P, Chen QH, Li QF *et al*. Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(3): 66-73. [林鹏, 陈启慧, 李琼芳等. 环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析. 水资源保护, 2021, **37**(3): 66-73.]

[71] Ma Q, Tian W, Wu ZM. Total phosphorus and total nitrogen concentrations of the water diverted from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 207-212. DOI: 10.18307/2014.0206. [马倩, 田威, 吴朝明. 望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 207-212.]

[72] Huang CL, Li X, Sun YY. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 22-31. DOI: 10.18307/2017.0103. [黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及"引江济太"工程对其的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 22-31.]

[73] Cao JP, Li HY, Peng YM *et al*. Prepared options for annual water allocation in major river courses and lakes of Taihu Lake Basin. *China Water Resources*, 2019, (5): 13-15, 21. [曹菊萍, 李昊洋, 彭焱梅等. 太湖流域重要河湖河道内年度水量分配拟定初步探索. 中国水利, 2019, (5): 13-15, 21.]

[74] Xu RC, Pang Y, Hu ZB. Analysis on the water quantity changes from Jiangsu section entering Lake Taihu from 1990 to 2019. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 797-805. DOI: 10.18307/2021.0315. [胥瑞晨, 逄勇, 胡祉冰. 1990－2019 年江苏片区入太湖水量变化及原因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 797-805.]

[75] Wang CZ. Fujiwhara effect. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2021, **11**(6): 81. [王春竹. 藤原效应(Fujiwhara effect). 气象科技进展, 2021, **11**(6): 81.]

[76] Wu WQ. Making efforts for integration and high-quality development of the Yangtze River Delta with the overall improvement of water security safeguarding capacity of the Taihu Basin. *China Water Resources*, 2021, (16): 7-8. [吴文庆. 全面提升太湖流域水安全保障能力 全力服务长三角一体化高质量发展. 中国水利, 2021, (16): 7-8.]