

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 07

考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案

陆志华,李勇涛,钱旭,蔡梅,李敏

(太湖流域管理局水利发展研究中心,上海 200434)

摘要:通过对多年实测资料的分析,研究了太湖水环境改善需求,明确了影响太湖水质改善的关键因子,设计了考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案,并对调度方案的效果进行了分析。结果表明,考虑太湖水质指标的优化调度对竺山湖水质具有较为明显的改善作用,建议在新孟河江边枢纽调度中考虑太湖水质指标,通过改善竺山湖水质促进太湖总体水质提升。

关键词:水质指标;骨干工程;调度方案;太湖流域;竺山湖

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)06 - 0044 - 05

Scheduling scheme of Taihu Basin key projects considering water quality index of Taihu Lake

LU Zhihua, LI Yongtao, QIAN Xu, CAI Mei, LI Min

(Water Conservancy Development Research Center, Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, China)

Abstract: Based on the analysis of measured data for many years, the demand for water environment improvement in Taihu Lake was studied, and the key factors affecting the water quality improvement of Taihu Lake were identified. The scheduling scheme of the key projects of the basin considering the water quality index of Taihu Lake was designed, and the effect of the scheduling scheme was analyzed. The results show that the optimized scheduling scheme considering the water quality index of Taihu Lake can improve the water quality of Zhushan Lake obviously. It is suggested that the water quality index of Taihu Lake should be considered in the scheduling scheme of the Xinmenghe River Riverside Junction, and the overall water quality of Taihu Lake can be promoted by improving the water quality of Zhushan Lake.

Key words: water quality index; key project; scheduling scheme; Taihu Basin; Zhushan Lake

太湖流域的水问题突出表现为流域水体污染严重,水质型缺水明显,提高水动力条件是古老的水利调水工程衍生出的新型水环境改善措施^[1]。南朝等^[2]采用一维水量水质模型对引沁入汾工程调水前后的水质和水环境容量进行了模拟计算,研究发现引沁入汾跨流域调水工程使汾河下游段的COD和NH₃-N水环境容量分别比调水前增大了30.50%和31.88%。谢兴勇等^[3]采用巢湖一维水质模型模拟了引江济巢工程对巢湖TN、TP和Chl-a

指标的影响,结果表明,年调水量为9.57亿m³时可使巢湖的TN和TP浓度下降约16%和19%,Chl-a浓度峰值从51.42μg/L降至38.96μg/L,对巢湖夏季蓝藻暴发具有一定的缓解作用。王磊之等^[4]构建了反映防洪、供水、水环境需求的多目标函数,进行了面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究,研究表明与现状调度方案相比,加大太浦闸泄流量可以显著提高金泽水源地关键水质指标达标率。尚钊仪等^[5]以昆山主城及周边区域为研究对

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0401506);水利部公益性行业科研专项(201501015)
作者简介:陆志华(1987—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程调度、水生态文明建设等研究。E-mail:luzhihua2008@qq.com

象,通过 MIKE11 水动力水质数学模型进行微观模拟验证和决策分析,提出活水畅流工程建设布局及调度方案,结果显示通过现状工程调度和规划工程建设,圩内河道平均流速达到 0.057 m/s,圩内河道可基本消除黑臭。太湖流域内近年来也开展了多次流域区域调水引流试验,2013 年实施的太湖流域湖西区水量调度与水环境改善试验极大程度上改善了太湖的水资源补给和水环境状况^[6]。为充分发挥治太骨干工程的综合效益,改善流域水环境,2002 年太湖流域正式实施引江济太调水工程。利用治太骨干工程体系将长江清水引入太湖和河网,由于受水区水体流动速度加快、水量增加,通过水体的稀释和自净能力提高,受水区水体水质明显改善^[7]。

近年来太湖流域骨干水利工程体系不断加快建设,新孟河延伸拓浚工程是提高流域水环境容量引排通道之一,也是国务院批复的《太湖流域防洪规划》中提出的流域洪水北排长江的主要防洪工程之一,《太湖流域水资源综合规划》也将新孟河作为流域水资源配置的重要引水河道。目前,新孟河延伸拓浚工程正在实施中,预计 2021 年可以建成通水,实施后可加快太湖西北部湖区的水体流动,促进太湖湖体的水流循环,改善太湖、洮湖、滬湖特别是太湖西北部湖湾的水环境状况。

现行的《太湖流域洪水与水量调度方案》中太湖流域实施引江济太时,望亭水利枢纽需要根据望虞河水质情况进行调度,但是,目前流域骨干工程还未有参考太湖的水质指标进行相应调度的研究与实践。鉴于此,本文研究考虑太湖水质指标的流域骨干水利工程调度方案,以期今后骨干工程调度方案的优化、完善提供技术参考。

1 研究区概况

太湖流域地处长三角南翼,北抵长江,东临东海,南滨钱塘江,西以天目山、茅山等山区为界。流域属典型的平原河网地区,水面面积达 5 551 km²,水面率为 15%;河道总长约 12 万 km,河道密度达 3.3 km/km²。流域水系以太湖为中心,分上游水系和下游水系。上游水系主要为西部山丘区独立水系;下游主要为平原河网水系。

望虞河是太湖主要通江河道之一,全长 60.8 km,沿线地形平坦,其西部为澄锡虞高地,东部为阳澄区。新孟河工程北起长江,自大夹江向南新开河道至小河闸北 1.58 km 接老新孟河,沿老新孟河拓浚至京杭运河,立交过京杭运河后新开河向南延伸至北干河,拓浚北干河连接洮滬湖,拓浚太滬运河和漕桥河入太湖,工程全长 116.69 km。本研究主要依托

望虞河工程和新孟河工程,在调度运行中考虑太湖水质指标进行调度方案研究。望虞河工程和新孟河工程位置分布如图 1 所示。



图 1 望虞河工程和新孟河延伸拓浚工程位置分布

2 研究方法

采用太湖流域平原河网水量水质数学模型^[8](以下简称太湖流域模型)定量分析考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案对太湖水质的影响。该模型在综合分析太湖流域平原河网特点的基础上,根据水文、水动力学等原理,模拟流域平原河湖、河道汉口连接和各种控制建筑物及其调度运行方式,对流域各类供、用、耗、排进行合理概化,耦合一维河网和二维太湖,模拟流域平原河网地区水流运动,对河湖水量、水质进行联合计算,并采用一体化集成模式,将模型核心技术、数据库技术、地理信息系统技术及信息处理技术在系统底层进行集成,形成适合于太湖流域河网水量水质计算的系统平台。太湖流域模型包括降雨径流模型、河网水量模型、污染负荷模型、河网水质模型、太湖湖流模型和太湖湖区水质模型共 6 个子模型。6 个子模型并非孤立的,大部分子模型间是相互嵌套、有机耦合的,各子模型相互间的逻辑关系见图 2。其中,河网水量模型包括湖、荡等零维模型和河网一维模型,河网一维非恒定流动基本方程组为圣维南方程组;河网水质模型与水量模型耦合联算,采用控制体积法进行数值离散。模型主要边界包括外江、海潮位边界、环太湖水位边界、山丘区入流流量边界以及其他流量边界。

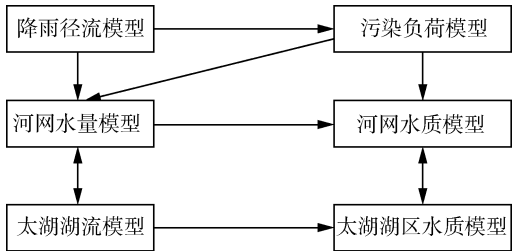


图 2 太湖流域模型结构

1991 年大洪水之后,太湖流域先后实施并完成了望虞河、太浦河、环湖大堤、杭嘉湖南排后续、湖西引排、武澄锡引排、东西苕溪防洪、杭嘉湖北排通道、红旗塘、扩大拦路港泖河及斜塘、黄浦江上游干流防洪等一轮治太 11 项骨干工程建设。本研究综合流域二轮治太规划工程推进与实施进展以及区域骨干工程建设情况,研究工况为在一轮治太工程基础上考虑以下工程:已建成的走马塘拓浚延伸工程、已开工建设的新沟河延伸拓浚工程、新孟河延伸拓浚工程、太嘉河工程、杭嘉湖地区环湖河道整治工程、扩大杭嘉湖南排工程、平湖塘延伸拓浚工程、苕溪清水入湖河道整治工程、望虞河西岸控制工程等流域性治理骨干工程;已建成的苏州市七浦塘拓浚整治工程、西塘河引水工程、常熟市海洋泾引排综合整治工程等区域性治理骨干工程;杨林塘、京杭运河“四改三”等航道整治工程;苏州、无锡、常州、嘉兴、湖州等城市大包围工程。上述工程均在太湖流域模型中进行了更新概化。

研究依据《太湖流域水资源综合规划》和《太湖流域水量分配方案》,采用降水频率典型年法,在流域及区域 1951 年以来的降雨资料系列分析基础上,

在流域丰平枯水文典型年中选择平水年($P = 50\%$) 1990 年进行模拟分析。

3 太湖水质改善需求及关键因子分析

表 1 为 2002—2015 年太湖主要水质指标。由表 1 可见,太湖水体中 COD_{Mn} 基本为Ⅲ类、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 基本为Ⅱ类,可以满足《太湖流域水环境综合治理总体方案》(2013 年修编)中 2015 年目标要求。但是,TP 近年来一直为Ⅳ类,近 10 多年该指标改善不明显,与 2015 年目标尚有较大差距。TN 质量浓度在 2002—2010 年较高,一直为劣Ⅴ类,导致太湖水体一直属于劣Ⅴ类;2011—2015 年,TN 略有改善,已达到了 2015 年水质目标,但仍为Ⅴ类,制约了太湖总体水质状况类别。因此,从太湖水质状况来看, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 随着流域污染治理与调水引流等措施的实施呈好转趋势,太湖水质最需要改善的是 TN 和 TP。表 2 为 2012—2014 年太湖水源地水质指标平均浓度及等级。由表 2 可见,太湖贡湖水源地主要表现为 TP、TN 质量浓度超标,湖东水源地主要表现为 TN 质量浓度超标,从太湖水源地水质状况来看,最需要改善的指标也是 TP 和 TN。

表 1 2002—2015 年太湖主要水质指标

年份	COD_{Mn}		$\text{NH}_3\text{-N}$		TP		TN	
	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级
2002	4.19	Ⅲ	0.39	Ⅱ	0.064	Ⅳ	2.00	劣Ⅴ
2003	4.31	Ⅲ	0.5	Ⅱ	0.069	Ⅳ	2.41	劣Ⅴ
2004	5.03	Ⅲ	0.49	Ⅱ	0.079	Ⅳ	2.61	劣Ⅴ
2005	5.05	Ⅲ	0.47	Ⅱ	0.078	Ⅳ	2.48	劣Ⅴ
2006	5.90	Ⅲ	0.56	Ⅲ	0.097	Ⅳ	2.85	劣Ⅴ
2007	5.10	Ⅲ	0.39	Ⅱ	0.074	Ⅳ	2.36	劣Ⅴ
2008	4.41	Ⅲ	0.39	Ⅱ	0.072	Ⅳ	2.42	劣Ⅴ
2009	3.98	Ⅱ	0.32	Ⅱ	0.062	Ⅳ	2.26	劣Ⅴ
2010	4.08	Ⅲ	0.23	Ⅱ	0.071	Ⅳ	2.48	劣Ⅴ
2011	4.25	Ⅲ	0.22	Ⅱ	0.066	Ⅳ	2.04	劣Ⅴ
2012	4.34	Ⅲ	0.18	Ⅱ	0.071	Ⅳ	1.97	Ⅴ
2013	4.83	Ⅲ	0.15	Ⅱ	0.078	Ⅳ	1.97	Ⅴ
2014	4.25	Ⅲ	0.16	Ⅱ	0.069	Ⅳ	1.85	Ⅴ
2015	4.28	Ⅲ	0.15	Ⅱ	0.082	Ⅳ	1.85	Ⅴ
2015 年目标	6.00	Ⅲ	0.50	Ⅱ	0.060	Ⅳ	2.20	劣Ⅴ
2020 年目标	4.00	Ⅱ	0.50	Ⅱ	0.050	Ⅲ	2.00	Ⅴ

表 2 2012—2014 年太湖水源地水质指标

水源地	监测点	COD_{Mn}		$\text{NH}_3\text{-N}$		TP		TN	
		质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级	质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	评价等级
太湖贡湖水源地	南泉水厂取水口	3.79	Ⅱ	0.160	Ⅱ	0.071	Ⅳ	1.93	Ⅴ
	锡东水厂取水口	3.99	Ⅱ	0.120	Ⅰ	0.072	Ⅳ	1.81	Ⅴ
	金墅港水源地	3.52	Ⅱ	0.073	Ⅰ	0.029	Ⅲ	1.47	Ⅳ
太湖湖东水源地	渔洋山水源地	3.44	Ⅱ	0.060	Ⅰ	0.037	Ⅲ	1.19	Ⅳ
	浦庄(寺前)水源地	2.98	Ⅱ	0.005 7	Ⅰ	0.017	Ⅱ	0.83	Ⅲ
	太湖庙港水源地	3.49	Ⅱ	0.07	Ⅰ	0.038	Ⅲ	1.22	Ⅳ

因此,本研究认为 TP 和 TN 为太湖水质改善的关键控制指标。

图 3 为 2007—2014 年太湖 TP 和 TN 平均质量浓度年内变化趋势。由图 3 可见,TP 质量浓度变化上半年相对平稳,8 月前后为全年最高,后逐月下降,基本维持在Ⅳ类。TN 上半年均处于劣Ⅴ类标准,最高值集中出现在 3—4 月,7—11 月逐月下降至Ⅳ类标准,其中 9—10 月质量浓度最低,11 月—次年 3 月质量浓度又呈上升趋势,这表明太湖水体 TN 质量浓度与水温、水量呈一定负相关关系,根据相关研究,这种现象与 TN 的污染排放特征及水体氮的反硝化作用流失有关系^[9]。春季是氮肥大量使用的季节,而此期间往往是枯水期,温度也较低,同时细菌活性低,湖泊中反硝化过程等脱氮过程慢,形成了高氮、低水位的特征,此时水体氮的质量浓度特别高;而夏季随着施肥量的下降以及强降雨的稀释作用,同时湖体细菌活性旺盛,反硝化脱氮作用强烈,形成了高水位、低氮赋存量的特征。因此,太湖在 2—5 月最需要改善 TN 指标,8—10 月最需要改善 TP 指标。

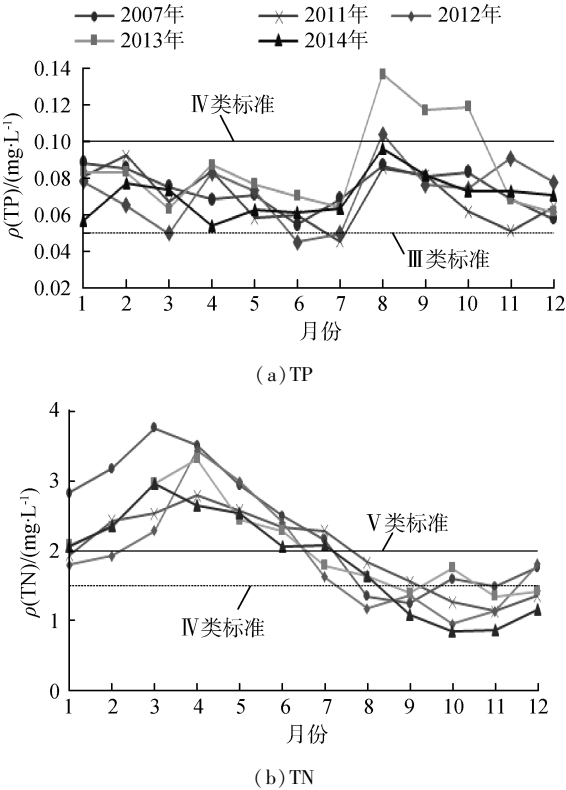


图 3 2007—2014 年太湖 TP 和 TN 平均质量浓度年内变化趋势

4 考虑太湖水质指标的骨干工程调度方案

4.1 调度方案设计

相关研究表明通过水利工程调度等措施可以在短时期内改善氮、磷指标^[10]。根据《太湖流域洪水与水量调度方案》,太湖水位调度线包括防洪控制

线、引水控制线,实行分时段分级调度,太湖防洪控制水位在 3.1 ~ 3.5 m,太湖引水控制水位在 3.0 ~ 3.3 m,当太湖水位处于引水控制线和防洪控制线之间时,流域骨干河道视流域和区域水雨情和水环境状况适时引排。因此,本研究将太湖水位处于引水控制线和防洪控制线之间的区间作为骨干工程增加考虑太湖水质指标的调度方案研究的执行区间(图 4),本次优化方案在太湖水位处于该范围内执行。为使望虞河工程、新孟河延伸拓浚工程发挥综合效益,本研究考虑在望虞河常熟枢纽、望亭枢纽、新孟河江边枢纽等工程中增加考虑太湖水质指标进行优化调度,增加考虑水质指标的调度方案具体为:2—5 月当 TN 质量浓度高于 2.0 mg/L 或 8—10 月 TP 质量浓度高于 0.06 mg/L 时,优化望虞河常熟枢纽、望亭枢纽、新孟河江边枢纽工程调度,增调长江清水入湖。考虑到 TP 质量浓度未达到 2015 年太湖流域水环境综合治理目标,TN 虽已达到 2015 年目标但未达到 2020 年目标,分别采用 2015 年 TP 目标质量浓度(0.06 mg/L)及 2020 年 TN 目标质量浓度(2.0 mg/L)作为工程调度的参考。太湖流域模型中长江边界水质浓度按照Ⅲ类水设置。优化调度的目标为在流域骨干工程调度中考虑太湖水质指标,当在设定时段内太湖水质指标超过设定的浓度值时,增强沿江口门引水,优化引江入湖,改善水动力条件,增强水体稀释自净能力,增加水环境容量,促进太湖西部水域、北部水域水质改善。

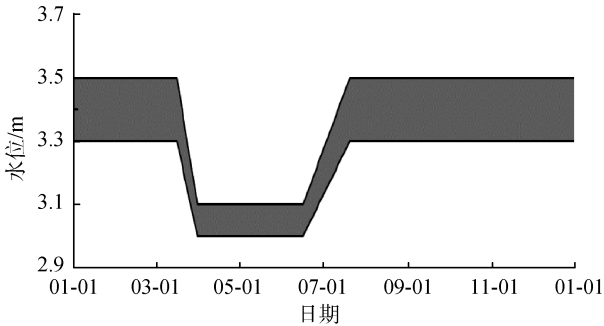


图 4 考虑太湖水质指标的调度方案执行区间

4.2 调度方案效果分析

采用太湖流域模型,选取平水典型年(1990 年型)对设计的方案进行调度效果模拟分析。通过模型模拟,得到基础方案及考虑水质指标方案的太湖水位过程如图 5 所示,1990 年型下考虑水质指标方案对太湖水位过程影响不大,水位最大变幅为 8 mm。经统计,2—5 月考虑水质指标方案可执行时间为 3 月 24—28 日、4 月 8—10 日、4 月 19—29 日、5 月 10—17 日,共 27 d;8—10 月考虑水质指标方案可执行时间为 9 月 2 日、9 月 18 至 10 月 9 日,共

13 d。因此,较基础方案,增加考虑水质指标方案可以增加 40 d 引江入湖的机会。

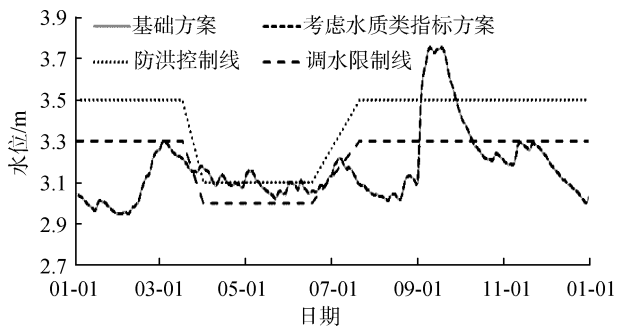


图5 基础方案及考虑水质指标方案的太湖水位过程

表3 为入湖水量统计。由表3 可见,与基础方案相比,全年期,增加考虑水质指标方案环湖口门总入湖水量增加 0.80 亿 m³,出湖水量增加 0.74 亿 m³;执行调度期,增加考虑水质指标方案环湖口门总入湖水量增加 0.41 亿 m³,增幅为 4.2%,出湖水量增加 0.17 亿 m³,增幅为 1.2%。可见增加考虑水质指标方案较大程度上提高了净入湖水量,总体有利于促进太湖水质改善。其中,执行调度期间湖西区入湖水量增加 0.39 亿 m³,增幅为 5.4%,望虞河入湖水量增加 0.04 亿 m³,增幅为 200%。

		表3 入湖水量统计		亿 m ³	
分区	项目	全年		执行调度期	
		基础方案	考虑水质指标方案	基础方案	考虑水质指标方案
湖西区	入湖	69.44	70.31	7.17	7.56
湖西区	出湖	0	0	0	0
望虞河	入湖	16.91	16.93	0.02	0.06
望虞河	出湖	6.78	7.07	0.29	0.40
环湖口门	入湖	109.90	110.70	9.73	10.14
环湖口门	出湖	124.56	125.30	14.13	14.30

表4 为执行调度期太湖水质统计。由表4 可见,考虑水质指标方案执行调度期间,贡湖、竺山湖的 COD、NH₃-N 质量浓度均有所下降,贡湖 COD 质量浓度下降 0.132 mg/L,降幅为 0.50%,NH₃-N 质量浓度下降 0.019 mg/L,降幅为 2.71%;竺山湖 COD 质量浓度下降 0.255 mg/L,降幅为 1.37%,NH₃-N 质量浓度下降 0.403 mg/L,降幅为 26.00%。贡湖、竺山湖的 TN、TP 质量浓度也均有所下降,贡湖 TN 质量浓度下降 0.011 mg/L,降幅为 1.24%,TP 质量浓度下降 0.0003 mg/L,降幅为 0.31%;竺山湖 TN 质量浓度下降 0.070 mg/L,降幅为 3.15%,TP 质量浓度下降 0.007 mg/L,降幅为 2.98%。因此,总体而言,增加水质指标方案有利于太湖总体水质改善,竺山湖主要水质指标改善效果要好于贡湖,同时从各指标改善幅度来看,竺山湖 NH₃-N 质量浓度改善最为明显,其他指标改善幅度不大。

		表4 执行调度期太湖水质统计				mg/L
监测断面	方 案	ρ(COD)	ρ(NH ₃ -N)	ρ(TN)	ρ(TP)	
贡 湖	基础方案	26.672	0.709	0.868	0.0873	
	考虑水质指标方案	26.540	0.690	0.857	0.0871	
竺山湖	基础方案	18.629	1.552	2.210	0.2350	
	考虑水质指标方案	18.374	1.148	2.140	0.2280	

5 结 语

本文以太湖及与其密切相关的流域骨干工程为研究对象,分析了太湖水质改善需求及关键影响因素,从通过水动力调控改善太湖水质的角度出发,设计了考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案,并用太湖流域模型进行了方案效果分析。研究发现平水年全年执行水质类指标调度的时间为 40 d,较基础方案增加了引长江水入太湖的机会,考虑太湖水质指标的调度方案一定程度上提高了净入湖水量,对竺山水质指标改善作用较为明显,但贡湖因其本底水质条件较好,水质指标改善效果一般。

参考文献:

[1] 顾孝荣. 提高水动力以改善城市水环境的方案探索[J]. 城市建设理论研究:电子版,2012(16):1-5. (GU Xiaorong. Study on the improvement of urban water environment by improving hydrodynamics[J]. Theoretical Study on Urban Construction: Electronic Edition, 2012(16):1-5. (in Chinese)).

[2] 南朝,冯民权,闫慧荣,等. 调水对汾河下游水环境的影响[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(1):21-25. (NAN Zhao, FENG Minquan, YAN Huirong, et al. Environmental impact of water transfer on the lower reach of Fenhe River[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydro Electric Power, 2010, 31(1):21-25. (in Chinese)).

[3] 谢兴勇,钱新,张玉超,等. 引江济巢对巢湖的水环境影响分析[J]. 环境科学研究,2009,22(8):897-901. (XIE Xingyong, QIAN Xin, ZHANG Yuchao, et al. Analysis on the influence of water diversion from Yangtze river to Chaohu Lake on Chaohu Lake's water environment [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(8): 897-901. (in Chinese)).

[4] 王磊之,胡庆芳,戴晶晶,等. 面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):61-68. (WANG Leizhi, HU Qingfang, DAI Jingjing, et al. Research on multi-objective joint operation of Taipu River oriented to water supply safety of Jinze Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 61-68. (in Chinese))

(下转第 70 页)

- 东营市水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 17-21. (ZHANG Xin, CHEN Huawei, SHI Yuzhi, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Dongying City in Yellow River Delta based on set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 17-21. (in Chinese))
- [13] 左其亭. 城市水资源承载力: 理论·方法·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [14] KRUSKAL J B. Toward a practical method which helps uncover the structure of a set of multivariate observations by finding the linear transformation which optimizes a new index of condensation, in statistical computation[M]. New York: Academic Press, 1969.
- [15] FRIEDMAN J H, TUKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis [J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, 23(9): 881-890.
- [16] 金菊良, 魏一鸣, 付强, 等. 农业生产综合力综合评价的投影寻踪模型[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 241-243. (JIN Juliang, WEI Yiming, FU Qiang, et al. Projection pursuit model for comprehensive evaluation of agricultural productive capacity [J]. System Sciences and Comprehensive Studies, 2001, 17(4): 241-243. (in Chinese))
- [17] 张光风, 张祖陆. 基于 GIS 的济宁市水资源承载力的主成份分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 21-24. (ZHANG Guangfeng, ZHANG Zhulu. Principal component analysis of water resources carrying capacity in Jinan based on GIS techniques [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 21-24. (in Chinese))
- [18] 薛联青, 朱祎真, 王思琪, 等. 基于投影寻踪的湖泊生态健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 67-72. (XUE Lianqing, ZHU Yizhen, WANG Siqi, et al. Lake ecosystem health assessment based on projection pursuit [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 67-72. (in Chinese))
- [19] 黄显峰, 贾永乐, 方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明建设评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 117-122. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 117-122. (in Chinese))
- [20] 夏军, 张永勇, 王中根, 等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1482-1488. (XIA Jun, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. Water carrying capacity of urbanized area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1482-1488. (in Chinese))
- [21] 潘兴瑶, 夏军, 李法虎, 等. 基于 GIS 的北方典型区水资源承载力研究: 以北京市通州区为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 664-671. (PAN Xingyao, XIA Jun, LI Fahu, et al. Applied study on evaluation method for water resources carrying capacity based on GIS techniques in typical north district [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4): 664-671. (in Chinese))
- [22] 马峰, 王千, 蔺文静, 等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价: 以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model: a case study in Shijiazhuang [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science Technology, 2012, 10(3): 62-66. (in Chinese))
- (收稿日期: 2017-12-28 编辑: 王芳)

(上接第 48 页)

- [5] 尚钊仪,张亚洲,戴晶晶,等.昆山主城及周边区域活水畅流改善水环境方案研究[J].水资源保护,2017,33(6):125-132. (SHANG Zhaoyi, ZHANG Yazhou, DAI Jingjing, et al. Study on water environment improvement scheme by living water flow in Kunshan main city and its surrounding areas[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6):125-132. (in Chinese))
 - [6] 费国松,胡尊乐.太湖流域湖西区水量调度与水环境改善试验研究[J].江苏水利,2015(7):40-44. (FEI Guosong, HU Zunle. Study on experiment of water dispatch and water environment improvement in west district of Taihu Basin [J]. Jiangsu Water Conservancy, 2015(7): 40-44. (in Chinese)).
 - [7] 刘春生,吴浩云.引江济太调水试验的理论和实践探索[J].水利水电技术,2003,34(1):4-8. (LIU Chunsheng, WU Haoyun. The theory and practice of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(1):4-8. (in Chinese)).
 - [8] 程文辉,王船海,朱琰.太湖流域模型[M].南京:河海大学出版社,2006.
 - [9] 赵林林,朱广伟,顾钊,等.太湖水体氮、磷赋存量的逐月变化规律研究[J].水文,2013(5):28-33. (ZHAO Linlin, ZHU Guangwei, GU Zhao, et al. Monthly variation of nitrogen and phosphorus volume in Taihu Lake, China [J]. Journal of China Hydrology, 2013(5):28-33. (in Chinese))
 - [10] 戴秀丽,钱佩琪,叶凉,等.太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015年)[J].湖泊科学,2016,28(5):935-943. (DAI Xiuli, QIAN Peiqi, YE Liang, et al. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015 [J]. Lake of Science, 2016, 28(5):935-943. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-12-17 编辑:王 芳)