

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.001

刘国庆,范子武,王波,等.基于同步原型观测的水质改善效果敏感性分析与应用[J].水利水运工程学报,2019(5):1-9.(LIU Guoqing, FAN Ziwu, WANG Bo, et al. Sensitivity analysis and application research of water quality improvement effect based on synchronous prototype observation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 1-9. (in Chinese))

基于同步原型观测的水质改善效果敏感性分析与应用

刘国庆,范子武,王波,柳杨,王蔚

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:将无锡运东大包围调水试验过程划分为背景期、调度期和恢复期3个阶段,通过长系列河网水动力-水质多要素同步原型观测,获得河网干支流水动力特性,掌握不同控制断面水质指标的变化规律,并分析水动力过程对不同水质指标改善的敏感性。在此基础上,基于引水流量、汊道分流比、河网流速、水位以及水质改善幅度控制阈值,论证白屈港-严埭港-转水河-环城河-古运河沿线主引水通道的可行性与存在的问题,构建区域精细化河网水动力模型,在模型率定验证基础上模拟了高水位单通道自引泵排、低水位单通道泵引泵排、双通道自引泵排运行方案,比选了不同生态补水方案的水动力与水质效果,为无锡运东大包围畅流活水方案制定提供了研究方法与数据支持。

关 键 词:原型观测;河网模型;生态补水;畅流活水;水动力;水质;敏感性分析

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2019)05-0001-09

我国长江下游太湖地区属于典型的平原城市河网区,区域地势平坦,河网管网交织,河网水体流动无序,甚至出现缓流滞留现象。另外,随着高城镇化率和城镇化建设的高速推进,在弱水动力条件下,河网污染物迁移扩散缓慢,导致河道水环境问题日益严重,城市河网水环境承载能力不足已成为制约社会经济可持续发展的瓶颈。近年来,以苏州古城区为代表的平原城市河网开展了系统的畅流活水综合治理研究。统筹流域-区域-城市防洪排涝、水环境,兼顾航运、景观等,利用外围优质水源,运用已有水利工程,以水系连通、动力调控为核心,通过控源截污、河道整治、强化净化、生态修复、精细管理等综合措施,科学调控河网水系,实现有序流动,从而改善城市水生态环境问题。目前,生态补水作为河网水环境提升综合措施的重要环节在我国多有实践,但水动力调控提升河网水质的机理尚不明确,从目前引水对河网水环境改善效果的分析来看,缺乏统一的评价指标体系,多数只列出了引水前后各水质因子的水质浓度和类别^[1-2],未能系统说明不同水质指标改善的敏感性或变化规律;梁媛等^[3]采用模糊综合评判法分析了太湖引水后黄浦江水质类别的变化规律;陈建标等^[4]利用原型调水试验数据建立了南通市河网水量水质模型,模拟评估了引江调水对河网 COD 和 NH₃-N 的改善效果;陈振涛等^[5]构建河网水质模型,采用水质改善率、类别变化指数和浓度变化指数探究了不同引水水量和水源水质对河网水质改善的影响;崔广柏等^[6]在河网水系结构与人工调度特点分析的基础上,在常熟市城区开展了引水试验,观测结果支撑了河道水动力指标流量与水质指标 COD, NH₃-N 数值模拟;贾海峰等^[7]围绕吴淞江右岸的甪直镇河网的 22 个断面进行了 8 次同步水文监测,指出水动力条件与水质状况存在较大的相关性,给出了以溶氧质量浓度上升为表征的水质改善。

从目前研究来看,大量水动力-水质同步原型观测试验数据主要用于支撑模型参数的率定验证,或用于

收稿日期:2019-04-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401503);江苏省水利科技重大技术攻关项目(2016005,2016009);水体污染控制与治理重大专项(2017ZX07203-002)

作者简介:刘国庆(1984—),男,安徽泾县人,高级工程师,博士,主要从事城市水力学与城市水环境方面研究。

E-mail: gqliu@nhri.cn 通信作者:范子武(E-mail: zwfan@nhri.cn)

评价引水对水环境改善的最终效果^[8-10]。生态补水对不同水质指标改善过程及其敏感性研究较少;另外,现有观测指标的全面性、时间连续性还存在不足,缺少大范围长系列连续观测资料,难以有效开展引水水动力对不同水质指标影响过程的系统分析。由于城市河网汊口节点多,内外污染源复杂,工程调度人为干预强,若完全采用传统水质模型通过调参或利用物理模型试验来模拟水动力对水质指标变化过程影响,相似性和水质边界存在很多不确定性,还难以揭示引水过程中水质指标随时间的变化规律,长系列多指标的同步原型观测是研究大范围河网区生态补水优化方案的重要手段。

本文以无锡运东大包围河网水系为例,开展了连续6 d的多指标水动力-水质同步原型观测,观测期包括了引水前的背景期、引水过程中的调度期、引水结束后的恢复期3个阶段,全面掌握了河网不同控制断面水动力、水质指标的变化规律,分析了水动力过程对不同水质指标改善的敏感性和变化幅度。构建了区域精细化河网水动力模型,开展了不同情景方案的模拟分析,并应用于无锡运东大包围生态补水方案的研究。

1 研究区域概况

无锡运东大包围位于苏南运河以东的中心城区,范围西至锡澄运河,南沿苏南杭运河,东以白屈港控制线为界,北至锡北运河,面积约136 km²。2003年无锡市开始实施城市防洪工程建设,2008年底建成,主要包括8大水利枢纽,32 km堤防以及11座小口门建筑物,可引太湖水或长江水进入城区,改善城区河网水环境。大包围水系以枢纽工程连接的河道为骨干河网,形成内外两级圩区的水系格局,水面率约为9.1%。该区域属于高城镇化平原河网区,具有水动力弱、人口密集、污染负荷重、调度复杂等特点。多年来区域水环境稳定性差,伯渎港、北兴塘、九里河、古运河等骨干河道水质在V类左右,桐桥港、旺庄港、塔影河等圩内河道水质为劣V类,如何实现河网科学调控成为该区域水环境治理的迫切需求。

2 研究方法与河网模型

2.1 水动力-水质同步原型观测

2.1.1 原观要素与检测方法 河网水动力-水质同步原型观测是城市河网水动力与水质指标响应关系研究的重要手段,观测指标选择是系统掌握河网水动力特性、水质变化规律的关键。参考地表水环境质量标准(GB 3939—2002),考虑到相关指标选取的科学性、代表性,以及指标获取的可操作性,本试验监测了主要水质指标和关键水动力要素。其中,水质指标的检测方法均依据国家标准规定,水质监测指标为:溶氧(DO)(哈希溶氧仪HQ40D),浊度(哈希2100q便携式浊度仪),化学需氧量(COD)(GB/T 11914—1989),氨氮(NH₃-N)(HJ 535—2009),总磷(TP)、总氮(TN)(GB/T 11893—1989);水动力观测要素为:河道水位(H),流速(V),流量(Q),河道水位利用大包围已有水文站、闸泵站监测数据,另外,加密布设了河网内部水位监测点,补充获取实时水位信息,水准测量符合GB 12898—1991;汊道流量、流速采用声学多普勒剖面流速仪(ADCP)现场巡测,特别在河网水动力调试稳定后,开展关键断面全局测量,获得内部所有分汊河道的分流比。

2.1.2 试验方案与监测点位 在前期大量现场踏勘、数学模型试算以及水环境问题诊断的基础上,通过水源水质、水量、水势分析与河网槽蓄量计算,综合利用大包围枢纽和二级圩工程,制定了现状工程体系下的现场调水试验方案。方案运行时段为2018年5月8—14日,其中,背景期为5月8日8:00至9日8:00,调度期为5月9日8:00至12日8:00,恢复期为5月12日8:00至14日8:00。调度期工程连续不间断运行,试验期间同步监测水动力、水质变化。运东大包围生态补水原型观测方案见表1。

为系统掌握引水调度过程中,河网水动力、水质变化规律,对河网边界及内部监测点位进行了科学布控,测站位置见图1,包括20个水位(CS-1~CS-20),15个流量(CS-1, CS-5, CS-8~CS-20)以及15个水质(CS-1, CS-5, CS-8~CS-20)观测断面。

表1 运东大包围生态补水原型观测方案

Tab. 1 Original plan of ecological hydration surrounded by Yundong

编 号	工程名称	所属分区	背景期 (5月8—9日)	调度期 (5月9—12日)	恢复期 (5月12—14日)
1-1	严埭港枢纽	运东 大包围	开启	开启	开启
1-2	利民桥枢纽		开启	泵 $15 \text{ m}^3/\text{s}$	开启
1-3	仙蠡桥枢纽		开启	关闭	开启
1-4	江尖枢纽		开启	关闭	开启
1-5	北兴塘枢纽		开启	关闭	开启
1-6	九里河枢纽		开启	关闭	开启
1-7	伯渎港枢纽		开启	关闭	开启
2-1	太堡墩闸	北塘联圩	开启	关闭	开启
2-2	一号桥闸		开启	关闭	开启
2-3	顾桥港闸		开启	关闭	开启
2-4	百子桥泵		泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$
2-5	新西泵	三里桥泵	泵 $2 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $2 \text{ m}^3/\text{s}$
2-6	三里桥泵		泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$
3-1	纳新桥泵		泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$
3-2	九里基泵	耕渎圩	泵 $2 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $2 \text{ m}^3/\text{s}$
4-1	1602闸	广塘联圩	开启	关闭	开启
4-2	范家桥泵		泵 $2 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $2 \text{ m}^3/\text{s}$
5-1	兴隆闸	兴隆圩	开启	关闭	开启
6-1	塔影河泵	塔影圩	泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$	关闭	泵 $3 \text{ m}^3/\text{s}$

注:所有枢纽、闸泵调控由区域所在市、区水利主管部门统筹协调,统一调度。

2.2 河网模型构建与率定验证

2.2.1 水动力模型构建 根据无锡运东大包围内河流形态及其水流特性,建立了区域精细化河网模型,将河网概化成为若干河段,河段由汊点连接,运用经典水力学公式圣维南方程组和汊点连接方程,详尽地描述了河道水体流向不定的特性。利用 Preissmann 四点隐式格式进行差分,并采用双追赶法求解模型^[11]。

无锡运东大包围河网模型主要采用实测断面进行构建,河网模型涉及河道 209 条,断面 1 534 个,主干河道断面间距 100~200 m,支流间距 50~100 m,模拟了河网内部 36 个二级圩,涉及 95 个泵站、103 个闸门,工程调度规则按照实际调度逻辑控制,模型构建过程参考文献[12]。

2.2.2 模型参数设置与率定验证 无锡运东大包围一维模型根据断面资料采用不等间距的节点布置,实测河道断面间距为 50~200 m,模型计算步长为 50 m。为满足模型计算稳定性和精度的要求,通过模型计算调

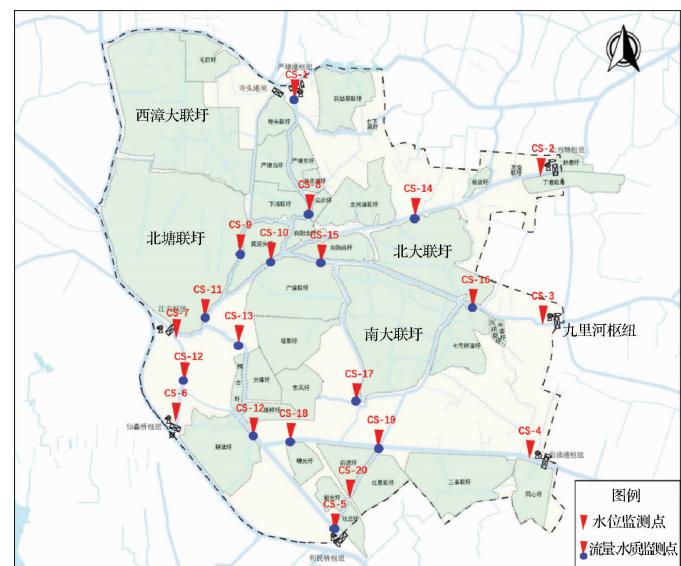


图1 监测站位分布

Fig. 1 Monitoring stations

试,时间步长采用30 s。

河网糙率主要参考《水力计算手册》、《无锡市城市防洪规划》以及《无锡市梁溪区水系规划(2017—2030)》等相关文献中有关人工渠道和天然河道的经验值,初步取值范围为0.020~0.045。

利用2018年5月9—12日现场调水试验观测的水位与流量成果,对模型进行率定验证,采用纳什有效系数 E_{ns} 和可决系数 R^2 对模型有效性进行评定, E_{ns} 用于表示模拟结果与实测数据近似程度, R^2 用来表示两个系列数据形状的吻合程度。

模型经过率定,最终确定严埭港、北兴塘、转水河、古运河、九里河、伯渎港等骨干河道糙率为0.022~0.025;环城河、桐桥港、旺庄港、冷渎港以及东亭港等河道糙率为0.025~0.030,其他二级圩内河道糙率为0.030~0.045。各断面水位最大误差在3 cm以内,流量模拟相对误差在10%以内, R^2 与 E_{ns} 处于合理区间,模型满足计算要求,相关结果见表2。

表2 模型率定验证结果
Tab. 2 Model calibration results

监测断面	所在河道	流量相对误差/%	水位最大误差/cm	E_{ns}	R^2	监测断面	所在河道	流量相对误差/%	水位最大误差/cm	E_{ns}	R^2
CS-1	严埭港	8.5	2	0.95	0.92	CS-11	转水河	5.8	1	0.84	0.83
CS-2	北兴塘		3	0.96	0.94	CS-12	环城河	7.9	3	0.75	0.74
CS-3	九里河		1	0.94	0.92	CS-13	古城河	8.8	2	0.70	0.66
CS-4	伯渎港		1	0.96	0.91	CS-14	北兴塘	6.3	2	0.72	0.76
CS-5	古运河		2	0.95	0.94	CS-15	九里河	8.3	2	0.81	0.81
CS-6	梁溪河		2	0.95	0.92	CS-16	九里河	7.0	3	0.57	0.50
CS-7	环城河		3	0.94	0.92	CS-17	桐桥港	8.5	2	0.76	0.77
CS-8	严埭港	7.0	2	0.48	0.53	CS-18	伯渎港	4.8	3	0.75	0.70
CS-9	埝埭港	9.6	2			CS-19	伯渎港	5.5	3	0.85	0.85
CS-10	转水河	5.3	2	0.74	0.73	CS-20	古运河	7.4	2	0.70	0.69

注:空白项表示对应断面作为边界控制点,或是该断面没有水位、流量监测。

3 水质改善效果敏感性与模拟分析

3.1 水动力要素变化过程分析

本次原型观测过程可以划分为背景期、调水期和恢复期3个阶段,如图2所示。背景期,无工程调度情况下,水动力过程符合平原河网区特点,上游-严埭港与下游-利民桥水位差较小,保持在0~5 cm的自然状态;调度期,随着枢纽工程调度运行,大包围内严埭港枢纽圩内水位逐渐上升后趋于稳定,利民桥枢纽圩内水位逐渐下降后趋于稳定,非稳定期持续时间约8~10 h,最终河网上下游形成15~20 cm水头差,沿程水位控制在3.3~3.5 m,河网水动力明显增强;恢复期,工程停止运行后,河网上下游又恢复0~5 cm水位差的弱动力状态。

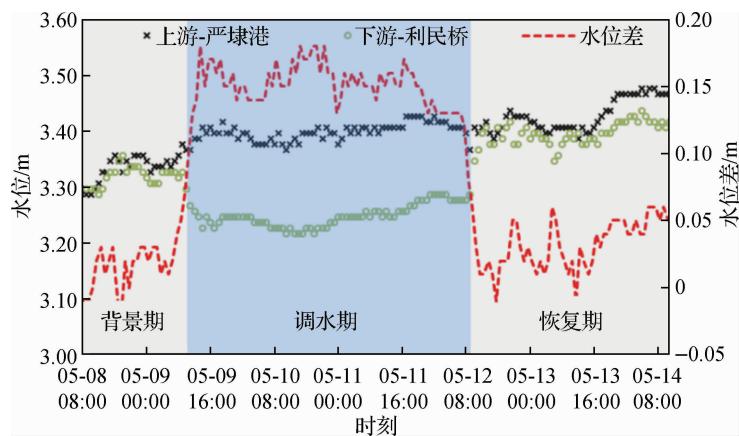


图2 调水试验期间上下游水位变化过程

Fig. 2 Process of upstream and downstream water level changes during water transfer test

另外,调水试验过程中,严埭港入流、利民桥出流稳定时流量为 $18.0 \sim 20.0 \text{ m}^3/\text{s}$;内部河网水位变幅10 cm以内,外部枢纽工程圩内水位最大变幅不超过13 cm。严埭港瞬时入流 $19.5 \text{ m}^3/\text{s}$,流速0.15~0.20 m/s,九里河分流约 $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、埝埭港分流约 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$,转水河分流约 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$;引水进主城区约 $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$,古运河分流约 $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$,流速约0.08 m/s,跨塘桥分流约 $0.32 \text{ m}^3/\text{s}$;环城河分流约 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$,流速约0.06 m/s,酱园浜流量较小;伯渎港入流 $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$,流速约0.08 m/s;旺庄港入流约 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$,流速约0.07 m/s。

从3个阶段的水动力变化特征看,运行调度满足原观试验方案设计的要求,并系统掌握了河网干支流水动力特性。

3.2 水质改善效果敏感性分析

从试验结果来看,引水入城后,严埭港-北兴塘-转水河-环城河-古运河主通道沿线各项水质指标明显改善,化学需氧量(COD)、总磷(TP)、溶解氧(DO)等水质指标改善效果提高了1个级别,达到了水质V类及以上标准,其他支流水质单指标浓度下降趋势明显,但受限于严埭港北部补水水源水质,氨氮(NH₃-N)指标维持在劣V类和V类范围波动,总氮(TN)单指标浓度虽有下降,但仍处于劣V类,试验期间各断面水质变化过程如图3所示。

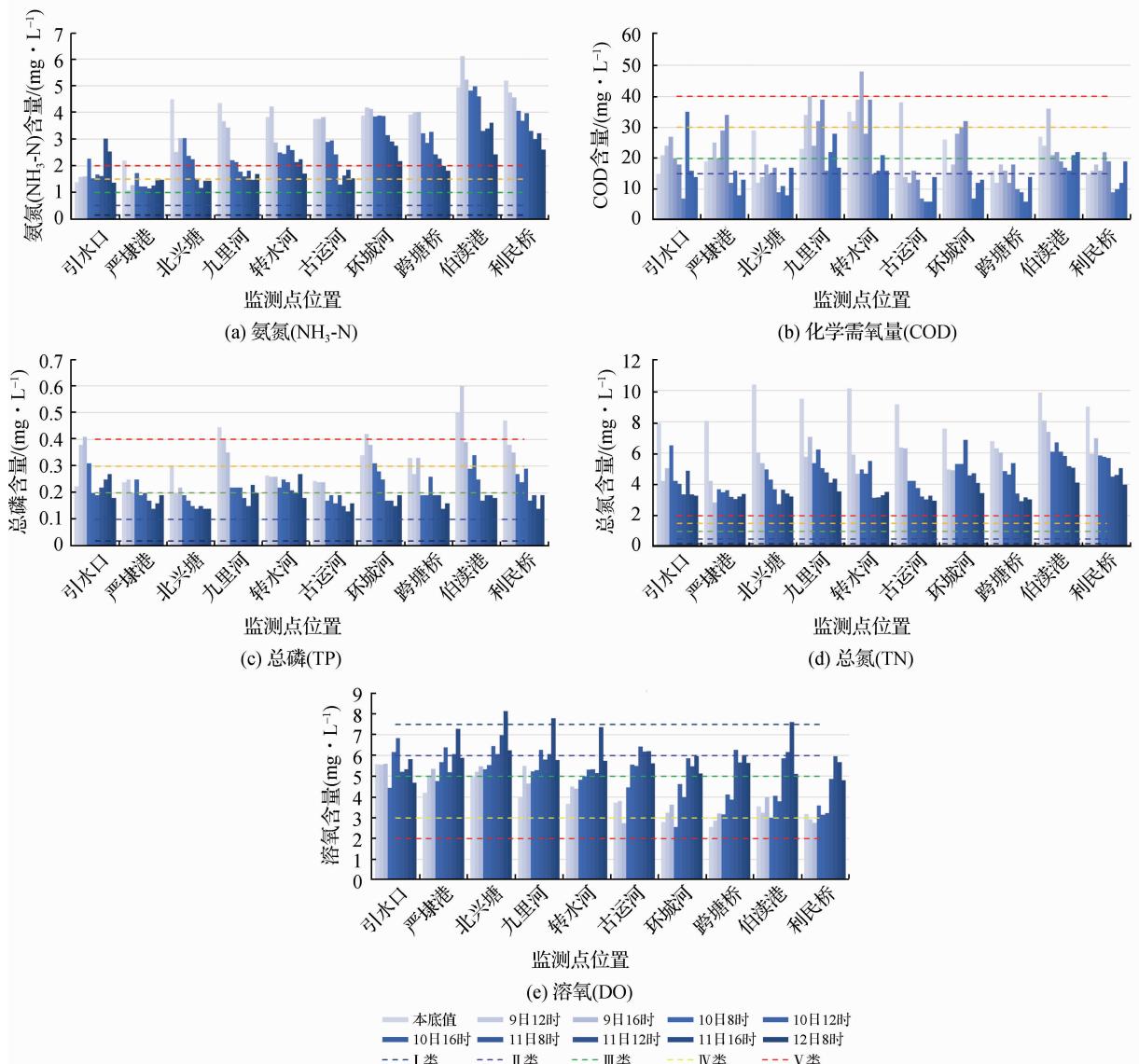


图3 典型断面不同水质指标随时间变化过程

Fig. 3 Process of different water quality indicators over time in typical sections

引水过程中不同水质指标在稀释、对流、扩散物理与生化作用下,其水质指标改善敏感性存在一定的差异。结果表明,总氮(TN)敏感性最强,引水4 h后基本达到浓度稳定下降状态;氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)敏感性次之,引水8 h后进入稳定改善期;溶氧(DO)引水24 h后进入稳定改善期;化学需氧量(COD)敏感性相对较差,引水32 h后才能达到浓度稳定下降状态。上述水质指标浓度最大下降幅度不超过原背景水质指标的70%~80%,溶解氧(DO)浓度上升幅度较大,最大上升幅度超过了120%,最终改善幅度基本一致,某些断面水质在长期流动状态下可以达到甚至超过源水水质的现象,表明污染物迁移扩散同时,动力作用有助于提升水体的自净能力。各水质指标变化情况如图4所示。

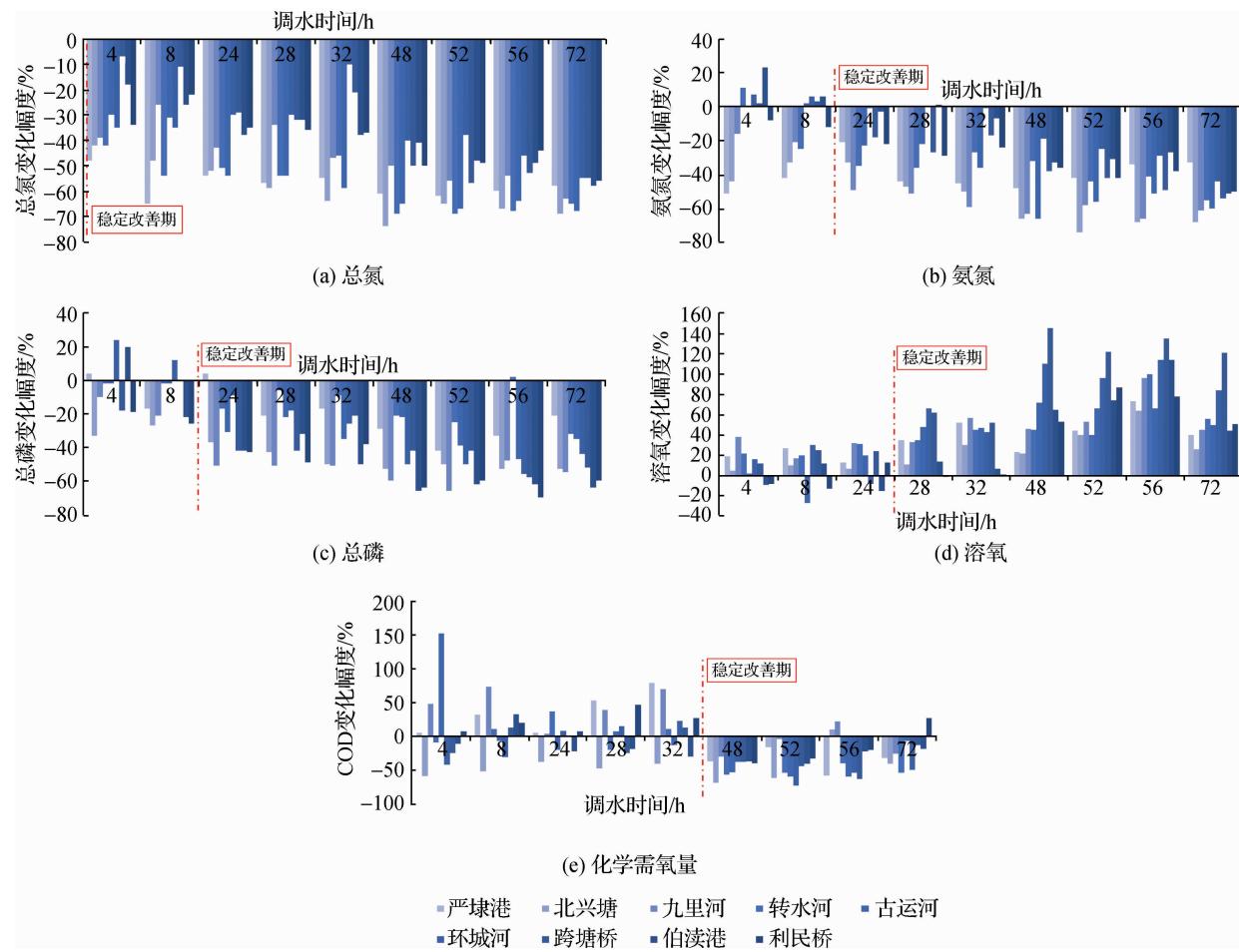


图4 典型断面不同水质指标改善幅度

Fig. 4 Improvement range of different water quality indicators for typical sections

3.3 生态补水方案模拟分析

上述同步原型观测结果表明,沿线主引水通道基本可行,一是水源水质相对稳定,二是在严埭港北部高水位条件下开闸自引水量有保证,但是,当严埭港外围水位低于3.6 m时,开闸自引,调水期间会造成城区内水位总体偏低,且水量难以满足区域生态补水的要求。为此,针对运东大包围外围水势情况,选择青阳、无锡(大)作为典型代表站,分析了近4年的水位资料,非汛期青阳、无锡(大)平均水位3.5 m左右,低于3.6 m的时段占到了60%,表明外围低水位情况存在且比例高,方案的优化需要综合考虑外围高、低水位的情景。

基于无锡运东大包围周边水位年际变化规律与水源特征,利用构建的精细化河网数学模型,开展了高水位单通道自引泵排、低水位单通道泵引泵排、双通道自引泵排3种类型4组运行方案数值模拟分析,表3给出了不同工况下生态补水方案。从引水流量(40~50 m³/s)、河网控制水位(3.70~3.40 m)、流速(0.05~0.10 m/s)以及水质改善时间(24 h)等阈值要求,完成了方案综合评估。比选了不同生态补水方案的水动力

与水质效果,优化了无锡运东大包围生态补水可行性方案。

表3 不同工况下生态补水方案

Tab. 3 Ecological water replenishment scheme under different working conditions

序号	方案名称	引水口调度	出水口调度	引水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	沿程水位/m	出口目标水质改善时间/h
方案1	高水位单通道自引泵排	严埭港节制闸开启	利民桥、仙蠡桥各开1台泵	43.6	3.63~3.41	20
方案2	低水位单通道泵引泵排	严埭港开启2台泵	利民桥、仙蠡桥各开1台泵	30.0	3.68~3.57	29
方案3	低水位双通道自引泵排~1	严埭港节制闸与船闸开启	利民桥开1台泵	28.8	3.49~3.37	30
方案4	低水位双通道自引泵排~2	严埭港节制闸与船闸开启	利民桥、仙蠡桥各开1台泵	40.8	3.49~3.40	21

利用大包围精细化河网模型,模拟了4种工况生态补水方案,结果表明:按照方案1运行,大包围内河网水位可以有效控制在3.63~3.41 m,引流量为43.6 m^3/s 、水质改善时间约20 h,满足主干河网沿线区域生态补水的阈值要求,因此,区域处于高水位时运行方案1是可行的。方案2~4属于区域低水位运行推荐方案,从模拟结果分析来看,方案2内部河网水位虽然满足需求,但引水流量偏低,水质改善所需时间略长,且严埭港泵站引水需进行枢纽改造,因此不推荐;方案3在引水流量、水质改善时间等方面与方案2相似,且内部控制水位偏低,因此不推荐;运行方案4可以满足引水流量、河网控制水位、水质改善时间对阈值的要求,因此,区域处于低水位时运行方案4是可行的。不同生态补水方案模拟成果如图5所示。

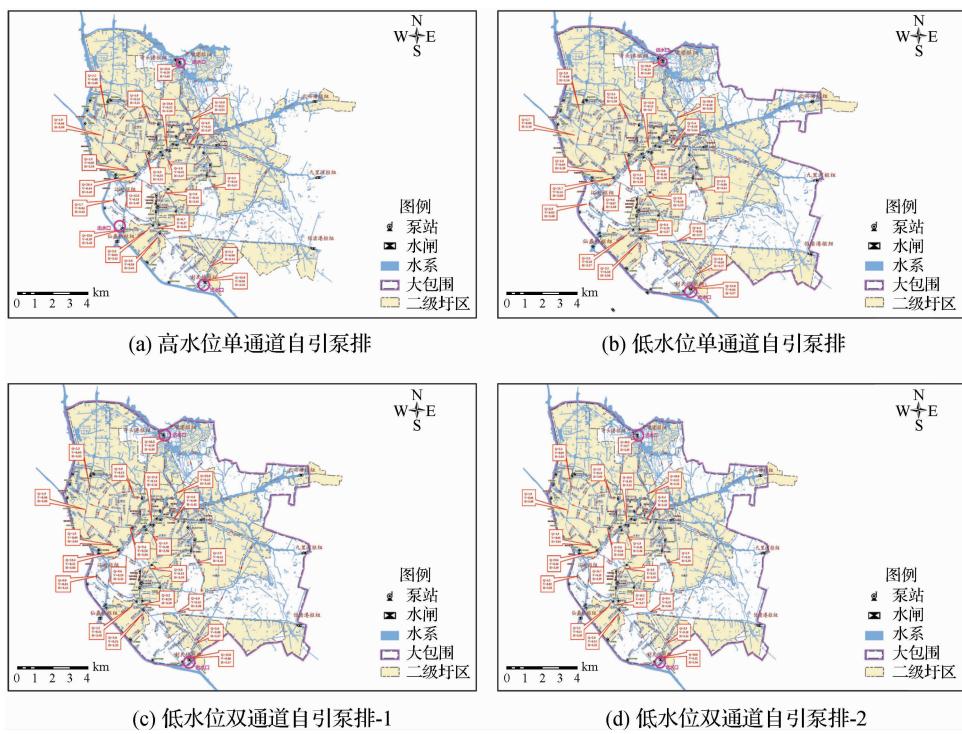


图5 不同生态补水方案模拟成果

Fig. 5 Simulation results of different ecological water replenishment schemes

4 结语

(1) 在控源截污、河道整治的基础上,综合运用运东大包围枢纽与二级圩控制工程,可以有效调控运东大包围内骨干河网以及二级圩的引水流量、干支流水量分配,重构南北水位差,形成河网有序流动格局。引水入城后,河网各项水质指标明显改善,在主引水通道沿程水质改善方面,不同监测断面水质改善与水源水质存在明显的关联性,水质改善效果在调水初期与水源距离存在空间滞后性,最终改善效果基本一致,水质指标最大下降幅度不超过原背景水质指标的 70%~80%,溶解氧(DO)数值上升幅度较大,最大上升幅度超过了 120%。个别断面水质在长期流动状态下可以达到甚至超过源水水质的现象,表明污染物迁移扩散同时,水动力作用有助于提升水体的自净能力。

(2) 引水过程中不同水质指标在稀释、对流、扩散物理与生化作用下,其水质指标改善敏感性存在一定的差异。从本次试验结果表明,总氮(TN)敏感性最强,引水 4 h 后基本达到稳定下降状态;氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、溶解氧(DO)敏感性次之,引水 24 h 后基本达到稳定下降状态;化学需氧量(COD)敏感性相对较差,引水 32 h 后基本达到稳定下降状态。

(3) 基于无锡运东大包围外部水位年际变化规律与水源水质特征,利用构建的精细化河网数学模型,可以从工程调度方式、引水流量、河网控制水位、流速以及水质改善时间等要素方面完成了生态补水方案的综合评估。平原河网区水源、水质复杂多变,河网模型是全局把控河网水动力、水质变化特性的重要工具。

参 考 文 献:

- [1] 童朝峰,岳亮亮,郝嘉凌,等.南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果[J].水资源保护,2012,28(6):49-54.(TONG Chaofeng, YUE Liangliang, HAO Jialing, et al. Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 49-54. (in Chinese))
- [2] 陈志和,陈晓宏,杜建,等.河网地区水环境引水调控及其效果预测[J].水资源保护,2012,28(3):16-21.(CHEN Zhihe, CHEN Xiaohong, DU Jian, et al. Water diversion and regulation of water environment and effect forecast in river network region[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 16-21. (in Chinese))
- [3] 梁媛,许健,麻林.利用模糊综合评判法分析由太湖引水后黄浦江水质的变化[J].甘肃农业大学学报,2014,49(1):116-120.(LIANG Yuan, XU Jian, MA Lin. Application of fuzzy comprehensive evaluation approach in Huangpu River water quality assessment after water diversion from Taihu Lake[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014, 49(1): 116-120. (in Chinese))
- [4] 陈建标,钱小娟,朱友银,等.南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟[J].水资源保护,2014,30(1):38-42,94.(CHEN Jianbiao, QIAN Xiaojuan, ZHU Youyin, et al. Simulation of improvement of water environment in river network of Nantong City by water diversion from Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 38-42, 94. (in Chinese))
- [5] 陈振涛,滑磊,金倩楠.引水改善城市河网水质效果评估研究[J].长江科学院院报,2015,32(7):45-51.(CHEN Zhentao, HUA Lei, JIN Qiannan. Assessing the efficacy of water diversion to improve water quality in city river network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(7): 45-51. (in Chinese))
- [6] 崔广柏,陈星,向龙,等.平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J].水利学报,2017,48(12):1429-1437.(CUI Guangbo, CHEN Xing, XIANG Long, et al. Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1429-1437. (in Chinese))
- [7] 贾海峰,杨聪,张玉虎,等.城镇河网水环境模拟及水质改善情景方案[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(5):665-672,728.(JIA Haifeng, YANG Cong, ZHANG Yuhu, et al. Simulations of a water quality improvement for urban river networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(5): 665-672, 728. (in Chinese))
- [8] 张秀菊,丁凯森,杨凯.新江海河河网地区水量水质联合调度模拟及引水方案[J].水电能源科学,2017,35(1):31-34.(ZHANG Xiuju, DING Kaisen, YANG Kai. Water quantity-quality joint regulation model and water diversion scheme in

- Xinjianghaihe River network[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(1): 31-34. (in Chinese))
- [9] 李晓, 唐洪武, 王玲玲, 等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 393-399. (LI Xiao, TANG Hongwu, WANG Lingling, et al. Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 393-399. (in Chinese))
- [10] 张蔚. 平原河网的水动力学及泥沙模型研究[J]. 水利水运工程学报, 2004(4): 70-74. (ZHANG Wei. Hydrodynamic and sediment model study of plain river network[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(4): 70-74. (in Chinese))
- [11] 柳杨, 范子武, 刘国庆, 等. 基于 Infoworks RS 的新沐河溃堤洪水风险分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 47-51. (LIU Yang, FAN Ziwu, LIU Guoqing, et al. Risk analysis of levee-breach flood for Xinshu River based on Infoworks RS[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(8): 47-51. (in Chinese))
- [12] 张小稳, 刘国庆, 范子武. 基于水动力—水质同步原型观测的城市生态补水方案研究[J]. 水资源开发与管理, 2019(4): 31-36. (ZHANG Xiaowen, LIU Guoqing, FAN Ziwu. Research on urban ecological water replenishment scheme based on hydrodynamic-water quality synchronous prototype observation[J]. Water Resources Development and Management, 2019(4): 31-36. (in Chinese))

Sensitivity analysis and application research of water quality improvement effect based on synchronous prototype observation

LIU Guoqing, FAN Ziwu, WANG Bo, LIU Yang, WANG Wei

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Wuxi Yundong surrounding water diversion test is divided into three phases: background period, dispatch period and recovery period. Through the long-series river network hydrodynamic-water quality multi-factor synchronous prototype observation, the hydrodynamic characteristics of main tributaries are obtained. The changes of water quality indicators at different control sections are mastered, and the sensitivity of different water quality indicators affected by the hydrodynamic process is analyzed. On this basis, in view of the diversion flow, ramp split ratio, river network flow rate, water level and water quality improvement range control threshold, the feasibility and existing problems of the main water diversion channel along Baiqu Port-Yanyu Port-Tuanshui River-Huancheng River-Grand Canal are demonstrated, and a regional refined river network hydrodynamic model is constructed. On the basis of model calibration and verification, several operation plans related to the cyanobacteria period are simulated, including the high-water level single-channel self-priming pumping, low-water level single-channel pumping and dual-channel self-priming pumping. The hydrodynamic and water quality effects of different ecological water replenishment schemes are selected to provide research methods and data support for the development of the Wuxi Yundong water scheme.

Key words: prototype observation; river network model; ecological hydration; flowing water; hydrodynamics; water quality; sensitivity analysis