

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.017

基于闸控管理的城市内河水体富营养化特征

叶琳琳¹, 刘波¹, 张民², 南旭军¹, 李冬明³

(1. 南通大学地理科学学院, 江苏 南通 226000; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;
3. 南通市节制闸管理所, 江苏 南通 226000)

摘要: 分别于2013年夏季在江苏省南通市节制闸引水期、引水后与引水前采集不同级别城市河道水样, 研究基于闸控管理的城市河网水体中TN、TP、Chl-a和COD_{Mn}的分布特征, 并运用综合营养指数法对水体富营养化级别进行评价。结果表明, 一级河道通吕运河引水后营养级别降低, 引水对缓解通吕运河富营养化程度具有一定作用; 二级河道通甲河富营养级别显著高于通吕运河($n=3, p=0.003$), 通甲河在引水期、引水后与引水前水体都属于重度富营养级别, 由于同时受长江、通吕运河和海港引河等多水系来水影响, 引水后, 虽然综合营养指数有降低趋势, 但所属营养级别没有改变; 三级河道郭里头河营养级别显著高于通吕运河($n=3, p=0.02$), 但与通甲河没有显著差异($n=3, p=0.095$), 引水后, 郭里头河营养级别降为中营养, 主要是因为长江来水量大, 水体交换率高; 环城景观河濠河属于轻度富营养, 在引水后综合营养指数达到最大, 可能与其水系格局复杂有关。

关键词: 平原河网; 城市内河; 闸门控制; 富营养化; 综合营养指数法

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2014)04-0086-07

Characteristics of eutrophication in gate-controlled urban river

YE Linlin¹, LIU Bo¹, ZHANG Min², NAN Xujun¹, LI Dongming³

(1. School of Geography Science, Nantong University, Nantong 226000, China;
2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
3. Regulator Control Station of Nantong City, Nantong 226000, China)

Abstract: Water samples were collected from urban rivers of different levels during, after, and before water diversion through a regulator from the Yangtze River to Nantong City, Jiangsu Province, in the summer of 2013. The characteristics of distribution of TN, TP, Chl-a, and COD_{Mn} in a gate-controlled urban river network were analyzed, and the comprehensive nutrition index method was used to calculate the level of eutrophication. The results show that the trophic level of the first-class Tonglyu Canal declined after the water diversion, indicating that the eutrophication in the Tonglyu Canal can be reduced by water diversion. The trophic level of the second-class Tongjia River was significantly higher than that of the Tonglyu Canal ($n=3, p=0.003$). The Tongjia River had a heavily eutrophic status during, after, and before the water diversion. Although the comprehensive nutrition index showed a declining trend after the water diversion, the trophic status of the Tongjia River did not change, as the river was affected by the incoming water from the Yangtze River, the Tonglyu Canal, and the Haigang River. The trophic level of the third-class Guolitou River was significantly higher than that of the Tonglyu Canal ($n=3, p=0.02$), but showed no significant difference from that of the Tongjia River ($n=3, p=0.095$). After the water diversion, the trophic level of the Guolitou River declined to a medium-eutrophic level, which might have been caused by the high inflow from the Yangtze River and high water exchange rate. The Haohe River, which is a landscape river surrounding the city, had a slightly eutrophic status. The comprehensive nutrition index of the Haohe River reached its maximum level after the water diversion, which might have been caused by the complex drainage pattern.

Key words: plain river network; urban river; gate control; eutrophication; comprehensive nutrition index method

基金项目: 江苏省大学生创新训练计划(201310304095X); 河口海岸学国家重点实验室开放基金(SKLEC-KF201310); 国家自然科学基金(41201076)
作者简介: 叶琳琳(1981—), 女, 博士, 主要从事水资源保护与规划研究。E-mail: yelinlin8164@163.com

作为世界性的水环境问题,水体富营养化在我国尤为严重。但目前研究对象多以海洋、湖泊和水库的富营养化问题为主^[1-3],而针对人口密度高的城市河网富营养化研究尚不多见。城市河道多为小型水体,易受外界各种人为因素干扰,尚未建立循环良好的水体生态系统,缺乏自净和自维持的能力^[4]。闸门控制(以下简称闸控)是平原河网区水资源调度与管理的一种普遍手段,通过闸控科学调度水资源进行引清冲污,不仅可以补给河道水量,提高河道水环境自净能力,而且还可使污染物得到稀释,在短期内水质得到明显改善^[5-7]。郭海峰^[8]研究发现,通过设于大运河入江口的谏壁闸调引江水,对大运河镇江段水质具有明显改善作用。周俊等^[9]研究发现,通过闸控进行引水冲污,降低了武汉东湖的磷污染程度。可见,开展基于闸控管理模式下城市内河水体富营养化特征的研究,研究结果对科学调度水闸、改善城市河道水环境状况具有一定指导意义。

在经济发达的长江三角洲流域开展城市河道富营养化调查研究,预防河道大面积水华暴发,对于开发与保护长江流域水资源具有重要战略意义。杜霞等^[10]运用了综合营养指数法对上海市农村典型河道水体的富营养化进行了评价。笔者选取南通市一级河道通吕运河、二级河道通甲河、三级河道郭里头河和环城景观河道濠河为研究对象,运用综合营养指数法对南通市闸控型河网水体富营养特征进行研究,并对引水期、引水后与引水前水体综合营养指数进行比较,探讨引水冲污是否对缓解城市河道水体富营养具有显著影响,以期能为南通城市水资源调度管理以及后续研究生源要素在平原感潮河网地区的迁移转化规律提供重要参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

南通市地处江苏省东南部,位于长江下游北岸(31°41'06"~32°42'44"N, 120°11'47"~121°54'33"E),东濒黄海,南倚长江,河网交错水系纵横,属于典型的平原感潮河网地区。近年来,由于经济快速发展,部分污染企业密集,导致南通市河道水环境质量迅速恶化,严重威胁长江水质安全^[11]。节制闸位于南通市通吕运河上,距入江口2 km。节制闸控制的内河正常水位为2.4 m,正常天气下,内河水位低于2.6 m,每潮必引。大潮引水充分利用长江潮汐的潮差变化,通过自引引水改善主城区水环境质量。在农历每月月初和月半的潮汛期,利用2~3个大潮,首先将潮水通过节制闸引入一级河道通吕运河,抬高通吕运河水位,并通过自流进入城区,然后在长江

低潮时,利用市区几条主要的二级河道与长江之间的水位差,将城市的污染水体排入长江,完成换水过程。但汛期通过调度沿江涵闸引水的同时,部分沿海涵闸并未打开排水,致使部分河道水体没有充分流动起来,水体复氧能力差。而在非引排水期间,节制闸处于关闭状态,将内河水体与长江隔离,形成了近乎封闭的水体^[12]。

1.2 采样点设置

分别于2013年7月18日(引水期)、7月24日(引水后)和8月5日(引水前)在南通市河道开展表层水样的采集。通吕运河是江苏著名的通航运河、南通第一运河,西宽东窄,西起长江,由西向东依次流经南通主城区、通州区、海门市、启东市,最终流入黄海。在一级河道通吕运河设置3个采样断面,按水流方向分别为节制闸内1号、北城大桥2号、崇川大桥3号,每个断面设置3个采样点。二级河道通甲河设置3个采样点,按水流方向分别为龙王桥4号、法伦寺桥5号、通海交汇处6号。三级河道郭里头河设置4个采样点,按水流方向分别为郭里头桥7号、新生桥8号、濠滨花园东门9号、郭里园新村10号。在濠河设置9个采样点,分别为北濠桥中11号、城隍庙12号、珠算博物馆13号、和平桥14号、文化宫桥15号、怡桥16号、长桥17号、友谊桥18号和新城桥19号(图1)。

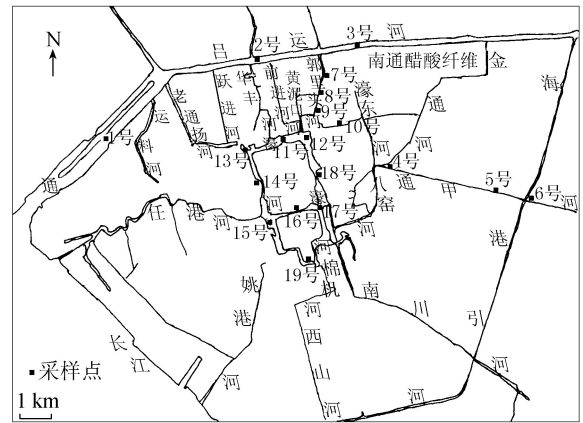


图1 研究区域水系图及采样点设置

1.3 指标分析方法

TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, TP 采用过硫酸钾氧化-钼酸铵分光光度法测定, Chl-a 采用乙醇萃取分光光度法测定, COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法测定^[13]。

1.4 富营养化评价方法

笔者选取综合营养状态指数法评价南通城市河道水体富营养化程度^[14-15]。综合营养状态指数计算公式为

$$I_{TL}(\Sigma) = \sum_{j=1}^m [W_j I_{TL}(j)] \quad (1)$$

$$I_{TL}(\text{Chl-a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \rho(\text{Chl-a})) \quad (2)$$

$$I_{TL}(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \rho(\text{TP})) \quad (3)$$

$$I_{TL}(\text{TN}) = 10(5.435 + 1.694 \ln \rho(\text{TN})) \quad (4)$$

$$I_{TL}(\text{COD}_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln \rho(\text{COD}_{Mn})) \quad (5)$$

式中： $I_{TL}(\Sigma)$ 为综合营养状态指数； W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重； $I_{TL}(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数。

以 Chl-a 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (6)$$

式中： r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数。

本研究使用 SPSS17.0 软件对两独立样本进行 t 检验,分析不同级别河道营养状态指数是否具有显著差异。

1.5 评价标准

由于目前还没有建立城市河道富营养化的评价标准体系,因此笔者根据湖泊富营养化评价标准^[14],对南通市河网水体的富营养化水平进行评价。营养状态指数小于 30 为贫营养级别,30 ~ 50 为中营养,大于 50 为富营养,50 ~ 60 为轻度富营养,60 ~ 70 为中度富营养,大于 70 为重度富营养。

2 研究结果

2.1 通吕运河

通吕运河 $\rho(\text{TN})$ 均值变化范围为 2.93 ~ 3.25 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 均值变化范围为 0.82 ~ 1.03 mg/L, $\rho(\text{Chl-a})$ 均值为 6.51 ~ 7.44 $\mu\text{g/L}$, $\rho(\text{COD}_{Mn})$ 均值为 3.36 ~ 3.51 mg/L(图 2)。引水期、引水后与引水前,通吕运河综合营养状态指数分别为 51.83、45.87 和 50.58,分别属于轻度富营养、中营养和轻度富营养。

2.2 通甲河

通甲河 $\rho(\text{TN})$ 均值变化范围为 4.68 ~ 8.76 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 均值变化范围为 1.06 ~ 2.43 mg/L, $\rho(\text{Chl-a})$ 均值变化范围为 12.09 ~ 39.72 $\mu\text{g/L}$, $\rho(\text{COD}_{Mn})$ 均值变化范围为 3.88 ~ 15.15 mg/L(图 3)。通甲河引水后, $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{Chl-a})$ 和 $\rho(\text{COD}_{Mn})$ 都是先减小后增大。引水期、引水后和引水前,通甲河水体综合营养状态指数分别为 73.74、71.04、74.91,都属于重度富营养。通甲河富营养级别显著高于通吕运河($n=3$, $p=0.003$)。

2.3 郭里头河

郭里头河的 $\rho(\text{TN})$ 均值变化范围为 4.06 ~ 4.67 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 均值变化范围为 1.07 ~ 1.37 mg/L, $\rho(\text{Chl-a})$ 均值变化范围为 9.07 ~ 21.28 $\mu\text{g/L}$, $\rho(\text{COD}_{Mn})$ 均值变化范围为 4.25 ~ 5.91 mg/L(图 4)。引水期、引水后和引水前,综合营养状态指数分别为 71.51、59.06 和 64.35,分别对应重度富营

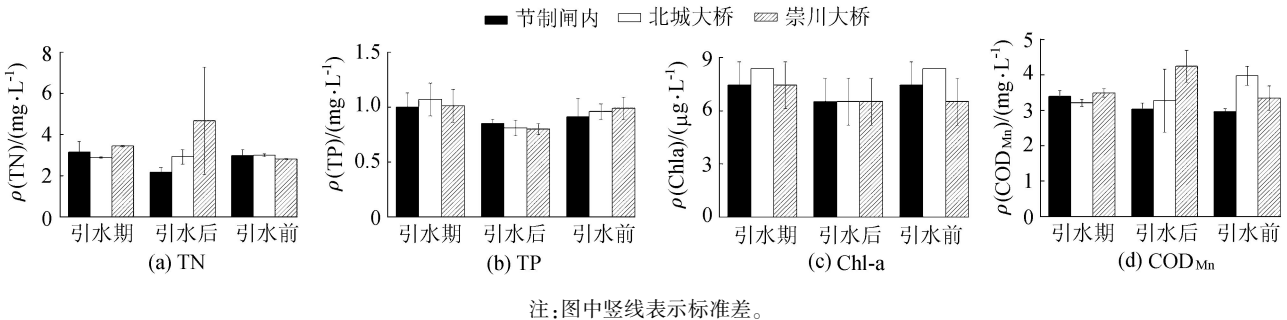


图2 通吕运河污染物质量浓度的时空变化

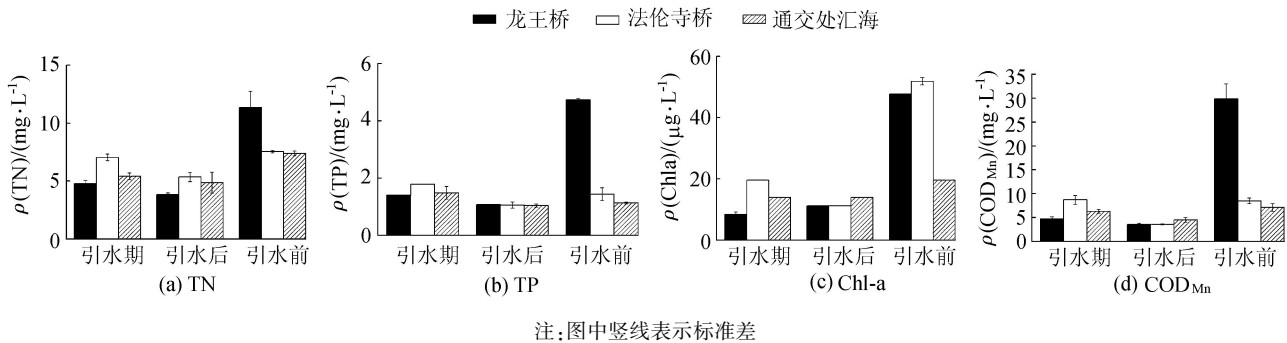


图3 通甲河污染物质量浓度的时空变化

养、轻度富营养和轻度富营养。从引水期到引水后, $\rho(\text{Chl-a})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 逐渐升高。引水前, 4 个采样点 $\rho(\text{Chl-a})$ 均超过 $10\text{ }\mu\text{g/L}$, 特别是濠滨花园东门的 $\rho(\text{Chl-a})$ 高达 $51.62\text{ }\mu\text{g/L}$ 。郭里头营养级别显著高于通吕运河 ($n=3, p=0.018$), 但与通甲河营养级别没有显著差异 ($n=3, p=0.095$)。

2.4 濠河

濠河中的 $\rho(\text{TN})$ 均值变化范围为 $3.04\sim3.34\text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP})$ 均值变化范围为 $1.00\sim1.06\text{ mg/L}$, $\rho(\text{Chl-a})$ 均值为 $9.30\sim11.47\text{ }\mu\text{g/L}$, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 均值为 $3.87\sim4.69\text{ mg/L}$ (图 5)。引水期、引水后和引水前, 综合营养状态指数分别为 50.06、57.80 和 50.59, 都属于轻度富营养。在引水期, 文化宫桥的 $\rho(\text{TN})$ 在所有采样点中最高, 达到 4.09 mg/L 。引水前, 除珠算博物馆外, 其他采样点的 $\rho(\text{Chl-a})$ 均超过 $10\text{ }\mu\text{g/L}$ 。引水前, 珠算博物馆 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 达到 7.18 mg/L 。

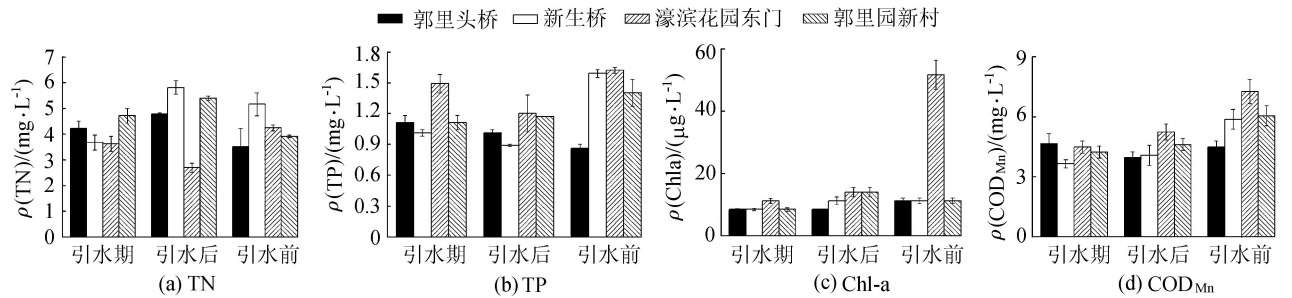
3 讨论

3.1 闸控管理模式的城市内河富营养化状况

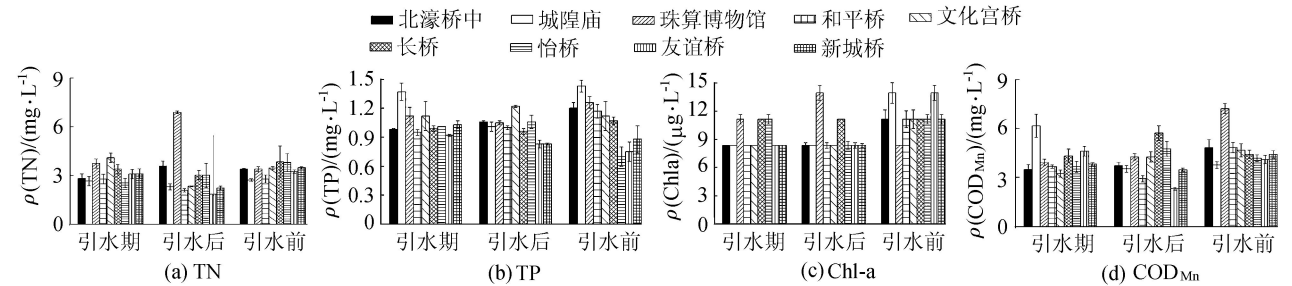
长江三角洲是中国河网最密集的地区之一, 在快速的城市化进程中, 该流域的水环境质量不容乐观。太湖流域杭嘉湖平原河网区^[16], 温瑞塘河地区^[17]以及崇明岛河网^[18]水体的富营养化相当严重。本研究发现, 南通市不同级别的城市内河在闸控管理模式, 其水体富营养化特征存在一定差异。通吕运河在引水期和引水前都属于轻度富营养, 引

水后营养级别降低, 表明引水对缓解通吕运河富营养化程度具有一定作用。通吕运河 TP 和 Chl-a 的质量浓度在引水后达到最低值, 表明引水可以缓解磷污染。这可能是因为一级河道流速相对较快, 有利于磷的自净和转移^[19]。此外, TP 质量浓度和 Chl-a 质量浓度的变化趋势一致, 表明藻类生长可能受到磷元素限制, 这与阮晓红等^[20]在苏州平原河网区的研究规律一致。但引水没有引起通吕运河 TN 质量浓度的降低, 这可能与长江水体中 TN 背景质量浓度较高有关^[21]。张颖纯等^[18]在崇明岛研究发现, 闸控型河网在从长江引水后, TN 质量浓度明显升高。此外, 研究结果表明引水前 3 个采样点中 TP 质量浓度较引水后有增加的趋势 ($n=3, p=0.07$), 可能是因为引水前水体一直处于淹水状态, 水体中溶解氧含量较低, 导致沉积物中磷的释放^[22-23]。

通甲河属于重度富营养化, 水体中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{Chl-a})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 在引水后都达到最低值。通过观察引水前后河流水深的变化情况, 发现引水后水深约增加 1/3, 约占河流流量的 30% 左右, 而其 $\rho(\text{TN})$ 在引水前后有 3 mg/L 的变化。和水量的变化相比较而言, 引水可以降低水体中 $\rho(\text{TN})$ 。同理, 引水后水体中 $\rho(\text{TP})$ 降低, 也是由于引水所导致的稀释作用。但是通甲河引水后, 虽然综合营养状态指数减小, 但所属营养级别没有改变, 这可能是因为除从长江引水外, 海港引河也是其重要来水体系。海港引河北起通吕运河口, 在西南经狼山港务公司内小姚港闸入长江, 为人工开挖的二级河道。



注:图中竖线表示标准差
图 4 郭里头河污染物质量浓度的时空变化



注:图中竖线表示标准差
图 5 濠河污染物质量浓度的时空变化

由于河道两岸居民较多,沿河垃圾随意倾倒的现象一直没有得到有效遏制,导致水环境较差。因此,在引水过程中,从海港引河的来水在一定程度上加剧了通甲河的水体污染。

郭里头河是贯穿南通市区东部和北部的一条主要河道,属于三级河道,位于郭里园新村附近。大量生活污水的排入,再加上引排水不畅和引排能力弱,导致郭里头河富营养化较为严重。在3次采样过程中,郭里头河的 $\rho(\text{TN})$ 值是先增加再减小,而其 $\rho(\text{TP})$ 值是先较小后增加,表明氮磷变化特征不一致。有研究发现,在北运河下游典型河网区水体中氮磷的时间变化趋势也存在差异性^[24]。这可能是因为影响氮磷营养盐变化的因素较多,如地表径流、浮游植物吸收,以及微生物的降解等^[18,25]。此外,郭里头河引水后,有效缓解了水体富营养化级别,营养级别降为中营养,这是因为长江水经过节制闸引入后,流经通吕运河北城大桥,直接通过郭里头河闸流入郭里头河,而江水到达郭里头河时流速相对较快,来水流量较大,水体的换水率较高,从而有效改善了郭里头河的水质状况。

濠河是环绕南通古城的河流,由于是在天然水泊和古河道的基础上开挖而成,它的水系格局较一般河流更加复杂。濠河既有与之连接沟通的引水主干河道,又有形若脉络的传输泄洪之流。濠河的水源绝大部分来自南通节制闸引进来的长江水,在文化宫桥15号有任港河流入,另有少量的降水径流、工业污水和生活污水流入。与本研究其他城市河道不同,虽然濠河属于轻度富营养,但引水后,其综合营状态养指数达到最大,这可能与濠河本身复杂的水系格局有关。

3.2 闸控管理模式存在的问题及改进方向

在长江三角洲流域,对内河水体通过闸控管理进行水资源引清调度,是在现有的社会经济条件下,充分利用长江丰沛的水资源优势,在最短时间内投入最少、见效最快的一种水环境治理之路。但也有大量研究^[26-27]表明,单纯依靠引水冲污难以控制水体富营养化进程,引水冲污只是一项治表的应急措施。有研究^[26]发现,虽然杭州市自1986年起每年定期引钱塘江水冲洗西湖,但到1988年,西湖湖区叶绿素浓度反较引水前的1985年增加了12%。南京市玄武湖在3次引下关电厂冷却水冲洗及开闸泄洪后,湖水氮磷质量浓度及叶绿素浓度有所下降,但换水后,藻类数量和生物量又急剧回升^[27]。本研究也发现,通吕运河和郭里头河的总氮质量浓度在引水后不降反增,环城景观河濠河在引水后,综合营养状态指数达到最大值。以通吕运河为例,2012年通

吕运河引水量为8.7亿 m^3 , COD_{Mn} 和TP排污量分别为17877t和300t^[28],计算可得,引水后 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})=20.54\text{mg/L}$,超出V类水质标准15mg/L; $\rho(\text{TP})=0.34\text{mg/L}$,超出IV类水质标准0.3mg/L。由此可见,引水冲污并不一定能有效降低外源污染物的质量浓度。此外,引水期间,河道水动力条件的改变导致底泥再悬浮,引起内源氮磷营养盐的释放^[29]。平原感潮河网地区水系结构复杂,树枝状结构与网状结构相互交错,在涨潮和落潮过程中水体的往返运动,可能导致引排水过程中对同一控制片区内的河道造成新的污水流入,引发新一轮污染的产生^[7]。此外,引水冲污对营养盐的稀释能力还受引水方式、引水量、引水水质等多因素的影响^[30]。但在目前的水资源引清调度管理中,应急调度和日常调度均没有形成一套科学的调度方案,多以经验、感官判断作为引清调度依据,对水资源的动态变化没有进行合理的监督,对边界和区域的水量水质监测也没有跟上,调度的主观性、随意性较大,科学的对策措施和完整的调度方案较少^[7]。

由此可见,基于闸控管理模式的引水冲污不能从根本上缓解水体的富营养化进程。此外,有研究^[22]发现,引水冲污对南通市河道磷影响的有效距离为5km,因此,在对富营养化严重的城市内河水体进行引水冲污的同时,还应考虑曝气、底泥疏浚和生态修复等工程措施的综合运用,并且在进行引水冲污时,要对研究区域的引排能力、引水路线、引水时间以及引水量进行合理计算和论证^[31],研究闸控模式下河网内生源要素的迁移化规律。就南通市城市河道而言,首先应根据南通市高水系地区西南部滨江、东北部临海的特点,在大潮汛期间调度沿江涵闸引水的同时,开启沿海涵闸排水,使各级河道的水体流动起来,从而提高引水河道末端的水体更换程度,加快水体复氧,缓解水体富营养化进程;其次,还应应对重污染河道开展清淤工程,抑制城市河道内源污染物的释放;最后,要调整产业结构布局,大力发展清洁生产及循环经济,从根本上解决城市内河的水体富营养化问题。

4 结 论

a. 节制闸引水对一级河道通吕运河和三级河道郭里头河的水体富营养化程度有所缓解,但对二级河道通甲河和环城景观河濠河的影响较小。

b. 南通市城市河网内营养盐水平较高,氮磷营养盐含量已远远超过富营养化发生所需要的阈值。受浮游植物生长、河道来水水系及各种涵闸建设等人为因素的影响,氮磷等生源要素在平原感潮河网

地区的循环过程比较复杂。

c. 通过闸控管理进行引清排污,是一项介于治标和治本之间的水环境治理出路,在操作过程中需要形成科学管理、科学调度的格局,并辅以生态修复等工程措施,以从根本上解决平原河网地区的水体富营养化问题。

参考文献:

[1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学,2002,14(3):193-202. (QIN Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. Journal of Lake Science, 2002,14(3): 193-202. (in Chinese))

[2] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,25(3):589-595. (KONG Fanxiang, Gao Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(3): 589-595. (in Chinese))

[3] 韦桂秋,王华,蔡伟叙,等. 近10年珠江口海域赤潮发生特征及原因初探[J]. 海洋通报,2012,31(4):466-474. (WEI Guiqiu, WANG Hua, CAI Wuixu, et al. 10-year retrospective analysis on the harmful algal blooms in the Perl River Estuary[J]. Marine Science Bulletin,2012,31(4): 466-474. (in Chinese))

[4] 姜雪芹,禹娜,毛开云,等. 冬季上海市城区河道中浮游植物群落结构及水质的生物评价[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2009(2):78-87. (JIANG Xueqin, YU Na, MAO Kaiyun, et al. Assessment of algal diversity and water quality in the four urban rivers of Shanghai in winter [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science,2009(2): 78-87. (in Chinese))

[5] 王震球. “引江换水”在秦淮河生态修复治理中的实践与探索[J]. 中国水利,2009(2):40-42. (WANG Zhenqiu. Practice of Yangtze River diversion for Qinhuai River ecological recovery [J]. China Water Resources, 2009(2):40-42. (in Chinese))

[6] 孙娟,阮晓红. 引调清水改善南京城市内河水环境效应研究[J]. 中国农村水利水电,2008(3):29-31. (SUN Juan, RUAN Xiaohong. Study on Yangtze River diversion in improving urban water environment of Nanjing [J]. China Rural Water and Hydropower,2008(3):29-31. (in Chinese))

[7] 阮仁良. 平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究;以上海市水资源引清调度为例[D]. 上海:华东师范大学,2003.

[8] 郭海峰. 用模糊综合评判法分析长江引水对大运河镇江段水质的改善作用[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(4):157-166. (GUO Haifeng. Effect analysis of water

diversion from Yangtze River for water quality improvement in Zhenjiang Section of Grand Canal by fuzzy comprehensive judgement method [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2011,22(4):157-166. (in Chinese))

[9] 周俊,李国斌,梁震,等. 引水冲污工程治理东湖磷污染[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):27-29. (ZHOU Jun, LI Guobing, LIANG Zhen, et al. Diversion stream from the Yangtze River to East Lake for phosphorus loading reduction [J]. Environmental Science & Technology, 2002,25(4):27-29. (in Chinese))

[10] 杜霞,霍元子,邵留,等. 上海市农村典型河道水体富营养化调查与评价[J]. 生态学杂志,2011,32(3):9-15. (DU Xia, HUO Yuanzi, SHAO Liu, et al. The survey and evaluation of water eutrophication in Shanghai rural typical rivers[J]. Journal of Hydroecology,2011,32(3): 9-15. (in Chinese))

[11] 游珍,刘波,姚红. 南通市河网格局特征及水环境响应[J]. 水资源保护,2008,24(4):31-35. (YOU Zhen, LIU Bo, YAO Hong. Drainage pattern characteristics and effects on water environment [J]. Water Resources Protection,2008,24(4): 31-35. (in Chinese))

[12] 沈建,陈建标,肖玉兵. 南通市高水系引江调水水质改善分析与方案优化[J]. 人民长江,2012,43(10):72-74. (SHEN Jian, CHEN Jianbiao, XIAO Yubing. Analysis on water quality improvement effect of river system in Nantong by water diversion from Yangtze River and scheme optimization [J]. Yangtze River,2012,43(10): 72-74. (in Chinese))

[13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[14] 曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等. 固城湖及上下游河道富营养化和浮游藻类现状[J]. 中国环境科学,2012,32(8):1487-1494. (ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al. Assessment of trophic levels and phytoplankton variation in Guchenghu Lake and canal route [J]. China Environmental Science,2012,32(8): 1487-1494. (in Chinese))

[15] CARLSON R E. A trophic state index for lakes [J]. Limnology and Oceanography,1977,22(2):361-369.

[16] 何晓云,胡晔. 太湖流域杭嘉湖地区地面水环境质量分析[J]. 环境污染与防治. 2000,22(6):33-35. (HE Xiaoyun, HU Ye. Water analysis in the area of Hangjia Lake in Taihu River Basin [J]. Environmental Pollution and Control,2000,22(6):33-35. (in Chinese))

[17] 纪晓亮,朱元励,梅琨,等. 典型平原河网温瑞塘河地区的氮磷营养盐时空分布[J]. 浙江农业科学,2012(11):1571-1574. (JI Xiaoliang, ZHU Yuanli, MEI Kun, et al. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus in Wenrui tang plain river-net area [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2012(11):1571-1574.

- (in Chinese))
- [18] 张颖纯,姜德刚,李建华. 崇明岛“闸控型”河网水体富营养化特征及其影响因素[J]. 湖泊科学,2013,25(3):366-372. (ZHANG Yinchun, JIANG Degang, Li Jianhua. Characteristics of eutrophication and its affecting factors in gate-controlled river network system of Chongming Island[J]. Journal of Lake Science,2013,25(3):366-372. (in Chinese))
 - [19] 纪晓亮,商栩,朱元励,等. 温瑞塘河网水体中有机物和营养盐的时空分布特征[J]. 环境化学,2013,32(4):702-703. (JI Xiaoliang, SHAN Yu, ZHU Yuanli, et al. Temporal and spatial characteristics of organic matter and nutrients in Wenruitang lake system[J]. Environmental Chemistry,2013,32(4):702-703. (in Chinese))
 - [20] 阮晓红,石晓丹,赵振华,等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学,2008,20(5):556-562. (RUAN Xiaohong, SHI Xiaodan, ZHAO Zhenhua, et al. Correlation between chlorophyll-a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou[J]. Journal of Lake Science,2008,20(5):556-562. (in Chinese))
 - [21] 周俊丽,刘征涛,孟伟,等. 长江口营养盐浓度变化及分布特征[J]. 环境科学研究,2006,19(6):139-144. (ZHOU Junli, LIU Zhentao, MENG Wei, et al. The characteristics of nutrients distribution in the Yangtze River Estuary[J]. Research of Environmental Science,2006,19(6):139-144. (in Chinese))
 - [22] 蒋庆丰,周琳,赵玲,等. 南通市河道磷污染分布特征[J]. 南通大学学报:自然科学版,2009,8(3):42-46. (JIANG Qingfeng, ZHOU Lin, ZHAO Ling, et al. Distribution of phosphorus pollution in sediments from urban channels of Nantong, China[J]. Journal of Nantong University: Natural Science Edition,2009,8(3):42-46. (in Chinese))
 - [23] 孙慧卿,王平,江和龙. 不同模拟条件下太湖沉积物-水界面磷行为的研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(5):141-146. (SUN Huiqin, WANG Ping, JIANG Helong. Behavior of phosphorus in interface of sediment-overlying water in Taihu Lake under different simulative conditions[J]. Environmental Science & Technology,2012,35(5):141-146. (in Chinese))
 - [24] 单保庆,菅宇翔,唐文忠,等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布于富营养化评价[J]. 环境科学,2012,32(2):352-358. (SHAN Baoqing, JIAN Yuxiang, Tang Wenzhong, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in downstream river network areas of north canal river watershed[J]. Environmental Science,2012,32(2):352-358. (in Chinese))
 - [25] 何德进,邢友华,姜瑞雪,等. 东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价[J]. 环境科学与技术,2010,33(8):45-48. (HE Dejin, XING Youhua, JIANG Ruixue, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in water and eutrophication assessment of Dongping lake [J]. Environmental Science & Technology,2010,33(8):45-48. (in Chinese))
 - [26] 马玖兰. 西湖引水前后氮、磷、叶绿素 a 含量的年周期变化[J]. 湖泊科学,1996,8(2):144-150. (MA Jiulan. Annual cyclical changes of nitrogen, phosphorus and chlorophyll a concentration in west lake before/after water diversion[J]. Journal of Lake Science,1996,8(2):144-150. (in Chinese))
 - [27] 王国祥,濮培民. 若干人工调控措施对富营养化湖泊藻类种群的影响[J]. 环境科学,1999(2):71-74. (WANG Guoxiang, PU Peimin. Influence of some artificial controls on eutrophic algal population dynamics[J]. Environmental Science,1999(2):71-74. (in Chinese))
 - [28] 孙卫红,王金龙. 通吕运河控制断面水质达标分析[J]. 环境科学与管理,2010,35(10):39-42. (SUN Weihong, WANG Jinlong. TongLyu canal water quality control section analysis [J]. Environmental Science and Management,2010,35(10):39-42. (in Chinese))
 - [29] 郑西来,张俊杰,陈蕾. 再悬浮条件下沉积物内源磷迁移-转化机制研究进展[J]. 水科学进展,2013,24(2):257-295. (ZHENG Xilai, ZHANG Junjie, CHEN Lei. Advances in the study of migration and transformation mechanisms of endogenous phosphorus via sediment resuspension[J]. Advances in Water Science,2013,24(2):257-295. (in Chinese))
 - [30] 洪理健. 福州市内河引水冲污技术研究[J]. 人民珠江,2000(1):38-41. (HONG Lijian. Study on the technique of diverting water to flush out pollutants in urban rivers of Fuzhou city [J]. Pearl River,2000(1):38-41. (in Chinese))
 - [31] 高晓琴,张金池,沈波. 南通主城区纳潮置换水体及其绩效评估[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(2):109-112. (GAO Xiaoqin, ZHANG Jinchi, SHEN Bo. Replacement of water bodies by tidal prism of Nantong urban river and effect estimation[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2008,32(2):109-112. (in Chinese))

(收稿日期:2013-12-09 编辑:彭桃英)

