

调水对巢湖市河道水质的改善效果及 对浮游藻类的影响

李飞鹏¹, 张海平², 陈玲², 王成林³

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 中机国能电力工程有限公司, 上海 200061)

摘要:以巢湖市封闭河道为研究对象,采用水动力模型和生态动力学模型方法,结合野外围隔试验,探讨了调水对河道水质改善和水华抑制的作用效果,并通过调水试验对模拟结果进行了验证。计算出最优的调水周期,提出了合理的涵闸工程改造与科学的引排结合的措施。结果表明:调水能够使河道的水动力条件得到显著提高,平均流速均大于0.10 m/s,高于浮游植物生长临界流速,换水频率在21 d以内。通过一次调水试验表明模型的计算结果比较合理,科学合理的调水能达到抑制有害蓝藻水华在夏季暴发的目的。

关键词:调水; 城市河道; 水质; 浮游藻类; 水质改善; 水华抑制; 巢湖市

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)03-0030-05

Effect of water diversion on improvement of river water quality and phytoplankton in Chaohu

LI Feipeng¹, ZHANG Haiping², CHEN Ling², WANG Chenglin³

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. China Sinogy Electric Engineering Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract: Taking Chaohu close river as research object, using the hydro and ecological dynamics model, the paper probed the effects of water diversion on both water quality improvement and inhibition of algal bloom, and verified the simulation result through water diversion test. It used mathematical model to calculate the optimal cycle of water diversion and proposed the reasonable measures of integration of hydraulic structures rehabilitation/improvement with water diversion/drainage. The results indicated that water diversion can significantly improve the hydrodynamic conditions in urban rivers, make the average flow velocity more than 0.10 m/s, which is higher than the critical flow velocity of phytoplankton growth. The frequency of water diversion should be within 21 days. The calculation result is more reasonable through a water transfer test. Therefore, the scientific and reasonable water diversion can reach the goal of restraining harmful algal blooms to outbreak in summer.

Key words: water diversion; urban river; water quality; phytoplankton; water quality improvement; inhibition of algal bloom; Chaohu

稀释和冲刷作为引清调水工程改善水体水质的理论已经成为共识,当前在引清调水的技术方面,由以前的增大水量和稀释脏水向综合考虑调水的水量、水质及与其它工程的配合实施转变,更加注重整个水生态的功能平衡与资源保护^[1]。国际上以澳

大利亚河流水华的综合整治技术最有代表性,该技术通过对影响水华的临界流速、流量等的观测和模拟研究,利用调水引流和流量管理等综合技术控藻,取得了良好的效果^[2-3]。在我国,以水质改善和水华控制为目标的调水工程已有较多研究和案例,如

引江济太工程^[4]、三峡水库库区支流的调度方案研究^[5]等,同时,调水工程在城市河流水质改善与保障中也逐步应用,如郑州市的生态输水工程,对贾鲁河干流水质和景观改善起到了重要作用。然而,这些研究和应用多以水量调节为主,虽然对水环境改善和藻类控制起到了一定的作用,但长期的效果并不理想。从调水工程的主要过程水动力对藻类的影响来看,一定的水动力条件能够抑制藻类生长和水华暴发在多数水体已得到验证^[6]。水动力对藻类的影响应该从两方面考虑:一是水力冲刷作用,即藻类被水流夹带裹挟而从水体中迁移,上述以水量调节为主的调水工程即为此类;二是水力紊动剪切效应,即维持水体一定的紊动强度进而对藻类生长和水华暴发构成抑制,这既是当前研究的重点,亦应在调水工程实践中加以考虑^[7]。

巢湖市位于安徽省中部,是巢湖流域的重点城市。城内河道众多,由于长期水流不畅,不能内外沟通,再加上这些河道长期接纳生活污水、地表径流和生活垃圾,其环境问题一直为人们所诟病,尤其是夏季水华的频繁暴发,严重影响了经济和社会发展^[8]。为此,巢湖市开展了活水靓城工程,期望通过水力调度,提高河道释污、调蓄和自净能力。然而,由于对河道形态和水动力特性认识不足,导致调水期间部分河道存在死水区,水体扰动带来的大量营养盐会促使这些水域蓝藻疯长;而且仅凭经验决定调水频次和调水周期,使得调水效果较差,不能满足通过活水改善水体水质的要求。本研究结合巢湖市河道水质和浮游藻类分析,通过水动力模型和生态动力学模型优化调水方案,分析了调水对河道水质的改善效果以及维持一定流速对藻类的影响作用,以期调度引流技术的推广和应用提供参考。

1 研究方法

1.1 数学模型

调水对河道水质和浮游藻类的影响以数学模型为主要手段。调水方案通过水动力模型计算,并通过实际监测结果进行验证,为抑制夏季蓝藻的过度生长,通过精确模拟河道水闸等水工建筑物的开启,并结合引排结合的措施,保证河道流速维持在临界流速之上。调水频率通过水质模型和水动力模型计算得到。

根据巢湖城市河道的形态特征,水动力模型选择丹麦水环境研究所开发的 MIKE 11 模型。MIKE 11 具有计算稳定、精度高、可靠性强等特点,

能方便灵活地模拟闸门、水泵等各类水工建筑物,尤其适合应用于水工建筑物众多、控制调度复杂的情况^[9]。水质模型采用 MIKE 11 模型软件中的对流扩散模块和 Eco Lab 水质反应模块,前者用于模拟水体中溶解性或悬浮性物质随水流发生的对流扩散作用,后者用于模拟各种物质的水质反应过程。

利用 2010 年 7 月调水期间的河道流速实测值对模型进行了率定,结果显示,水动力模型的精度较高,濡须桥、草城和西坝口等 3 个断面的模拟流速值与实测值相比,误差分别为 5.5%、6.3% 和 3.9%。水质模型率定采用 2010 年 6-12 月环城河水系濡须桥、草城、西坝口等 3 个断面的月水质监测数据,包括 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 等 4 个指标。通过将模拟结果与实测数据对比分析,水质模型误差最大为 22%,满足本研究要求。

1.2 围隔试验

在同济大学崇明水环境基地,选择与巢湖城市河道水质类似的人工水体,进行了野外围隔试验研究,分析流速对浮游藻类的生长、繁殖及聚集、水域的生物多样性的影响及调节作用,实验的主要目的是为水量水质调配模型提供了抑制藻类生长的临界流速条件。定制多个围隔,置于中心湖,研究不同流速下(0、0.03、0.06、0.1、0.15、0.30 m/s)藻类生物量(Chl-a)、种群结构和数量的变化(具体可参考文献[10])。综合试验结果,提出控制巢湖市河道藻类生长的河道临界流速应在 0.10 m/s,即河道的平均流速超过 0.10 m/s 时,通过调水应该能够达到抑制浮游植物生物量和水华防治的效果。

1.3 调水试验及分析方法

选择代表性季节,在 2009 年和 2010 年 7 月对巢湖市河道进行了采样分析,对模型计算结果进行验证。根据代表性原则,分别在巢湖市各个河道布设了 10 个断面,其中,巢湖口巢湖闸(S1)和西坝口东(S2)各布设一个采样点,西环城河由于较长,布设两个采样点,分别位于西安桥闸内(S3)和中段(S4),天河(S5)、东坝口(S6)、洗耳池(S7)、东环城河(S8)、陆家河(S9)和丁岗河(S10)由于污染分布比较单一,分别布设一个采样点。

浮游植物采用 Phyto-PAM 现场测定,DO、pH 值、电导率、水温等指标通过便携式水质分析仪(Hq40d, HACH, 美国)测定并记录, COD_{Cr} 、TN 和 TP 的检测通过哈希 DRB200 进行消解器消解后,使用 DR2800 便携式分光光度计现场监测, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 无需消解,其中, COD_{Cr} 采用 US EPA 消解比色法(方法

8000 TNTplusTM)测定, TN 采用过硫酸盐氧化法(方法 10071 (Test' N TubeTM 管)), TP 采用消解-钼锑抗法(方法 10127 (Test' N TubeTM 管)), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用 US EPA 纳氏试剂法(方法 8038)测定, 具体方法参照了哈希公司编译的《水质分析实用手册》^[11]。

2 结果与讨论

2.1 河道水质概况

监测现场水温在 27℃ 左右, 除 S9 外, DO 总体处于较低水平, 说明巢湖城市河道污染比较严重, 水体自净能力弱。pH 总体处于中性水平, 电导率在 351 ~ 638 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间。浊度整体偏低, 这可能是河道整体偏窄, 有很高的护岸, 且水流迟缓, 因此风对巢湖市河道水体影响较小, 没有沉积物上浮而使得水体浊度升高。巢湖城区河流 COD_{Cr} 平均含量为 26.26 mg/L, TN 含量介于 0.25 ~ 10.20 mg/L, TP 含量介于 0.30 ~ 2.75 mg/L, 总体上受人为污染严重。部分河段如滞水区, COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量严重超标, 是其他河段的 2 倍之多。城市河道中浮游植物生物量显著高于巢湖闸附近水域 (S1 和 S2), 均在 90 $\mu\text{g}/\text{L}$ 以上。蓝藻是巢湖市城区河道的优势种, 而在一些流动比较缓慢的水体, 蓝藻水华经常发生。

2.2 调水方案

长期以来, 巢湖城市河道的调水路线有南线和北线。南线调水线路是在西坝通过引水闸, 由西坝闸从巢湖引水至天河, 经天河闸自排或由东坝一站抽排, 注入裕溪河, 该调水线路简单, 因此不作模拟分析; 北线调水路线是在西坝通过西安桥闸引水至西环城河, 经过东环城河后分两路, 一路经巢湖路涵进入洗耳池, 然后进入陆家河, 通过安成圩排涝干渠汇入东坝二站调蓄池, 由东坝二站涵自排或机械抽排进入抱书河, 汇入裕溪河; 一路经珍珠桥涵、施家桥涵汇入天河, 该路线比较复杂, 调水线路较长, 仅通过经验实施调水无法满足改善水质的需求, 因此需通过模拟计算优化调水方案。

通过模型计算, 对各种情况下北线调水的效果进行了详细计算分析。在现有的水利设施的前提下, 通过对不同方案的比较, 发现主要存在的问题有: 在城市内河处于最低水位 (6.1 m) 时, 巢湖引水经西安桥, 通过西环城河、东环城河后, 经由珍珠桥涵直接进入天河、或经由巢湖路涵-洗耳池-施家桥涵进入天河, 不流经陆家河, 因而无法改善陆家河水质, 对洗耳池的水质改善效果也不充分, 其南部水

体则始终无法得到置换; 由于丁岗河水位较高, 丁岗河水体无法得到置换。换水期间这些滞水区的存在, 不仅影响调水效果, 而且容易造成这些区域水质日趋恶化, 极易促使蓝藻水华暴发。因此, 通过对部分水工建筑物进行改造, 并改变换水模式, 可以发挥调水的最大效益, 保障所有存在的滞水区得到换水。主要的建议改造方案如下:

(1) 针对丁岗河和陆家河无法换水的问题, 在陆家河西闸附近配置水泵, 在经西安桥附近从巢湖引水之前关闸, 预先抽排部分河水, 降低水位, 待引水开始后开闸, 从陆家河西段自流引水。与陆家河类似, 在丁岗河下游设闸, 平时常开, 但在外部水体引水之前关闸, 并用临时配置的水泵预先抽排部分河水, 降低水位, 待引水开始后开闸, 从西环城河自流引水。

(2) 将珍珠桥涵和施家桥涵改造成涵闸工程, 以便于根据实际需要, 灵活控制调水线路, 如调水期间将珍珠桥和施家桥的闸门设置常关, 便可控制巢湖引水从西环城河流向洗耳池、陆家河、安成圩干沟、抱书河, 最终汇入裕溪河。

(3) 尽管能够通过南线调水改善天河水质, 但基于抑制天河浮游藻类生长的需要, 可在西坝新建引水闸, 平时常开, 由西坝闸从巢湖引水至天河, 保持天河水体长年流动, 当河道整体流速大于 0.10 m/s 时, 不仅能改善天河及天河清渠水质, 而且能够使浮游植物生物量得到充分抑制。

在假定以上工程措施实施的条件下, 巢湖城市水体基本可以得到完全置换, 从而最大程度地保障水体水质, 改善城市河道的富营养化现状。调水过程中, 西安桥泵的引水流量始终设为 3.8 m^3/s , 排水或自排或机排, 总排水流量也控制为 3.8 m^3/s , 内河水位在调水过程中始终保持在 6.1 m 左右, 这种条件下各河道的调水周期最短。当调水模式为引排结合并充分利用水位差实现自流时, 模拟结果还发现, 河道水体平均流速大于 0.10 m/s, 高于临界流速, 部分河道平均流速达到 0.15 m/s, 通过调水能够达到抑制浮游植物生物量的效果。

2.3 调水对水质的改善效果

调水工程对沿线水质的影响显著, 易引起水体水质恶化和诱发局部水华问题^[12], 因此应成为关注的重点。以所建立的模型对巢湖城市河道进行了模拟计算。

结果显示, 以 COD_{Cr} 为指标, 以地表水质量标准 IV 类为目标, 换水频率应不低于 26 d; 由于 $\text{NH}_4^+ -$

N 浓度整体低于Ⅳ类水,以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为指标时,以浓度下降 1 倍为目标,计算发现换水频率应不低于 21 d。

综合考虑夏季巢湖的现状水质,巢湖市城市河道的换水频率不应低于 21 d。

在现有的河道及水工建筑物的基础上,模拟结果显示,西环城河在开始引水后 24 h 水体得到彻底置换,东环城河需要 30 h。自 2010 年 7 月 22 日上午至 23 日下午进行了调水试验,整个调水周期约 33 h,西环城河和东环城河水体基本能够得到完全置换,丁岗河和陆家河在现有的条件下不能实现换水,这与水动力模型计算的结果是比较一致的,通过河道闸门调节,调水期间河道流速可达到 0.15 m/s,实现了短期活水的目标。并于 7 月 20 日至 8 月 18 日对调水前后西环城河(S4)和东环城河(S8)的水质和浮游植物生物量的变化进行了监测分析,

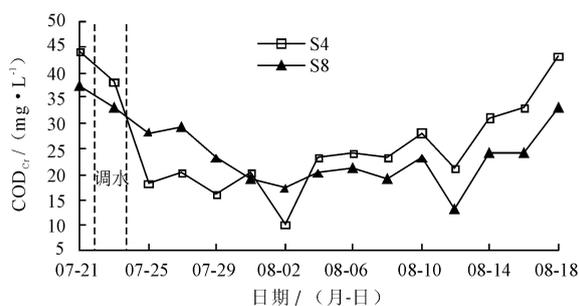
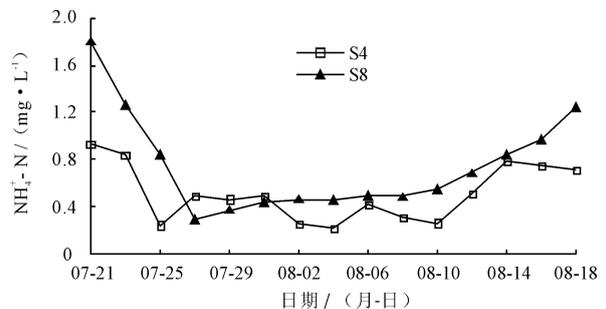


图1 调水前后对河道 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化

以评估调水对巢湖市城市河道水质改善和浮游植物抑制的效果。

一次调水前后 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化如图 1 所示。从图 1 可以看出,调水完成后,对两个监测河道来说, COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度均发生了显著降低,调水前 COD_{Cr} 浓度基本在 30 mg/L 以上,调水后均降至 30 mg/L 以下,能达到地表水质量标准Ⅳ类的目标,但 COD_{Cr} 在调水 24 d 后开始升高;调水前, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 S8 可达到 1.8 mg/L,在 S4 也接近 1.0 mg/L,但调水后第 2 d, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度发生了成倍的下降,在此后的 18 d 内基本保持在 0.5 mg/L 以下,但之后呈现上升的趋势,总体上调水可以保证 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 20 d 内保持相对较低水平,这与水质模型有关换水频率的计算结果比较接近。可见,以保障水质为目标,所构建的水动力和水质模型还是比较可靠的。



2.4 调水对浮游藻类的影响

调水前后河道 Chl-a 浓度的变化如图 2 所示。

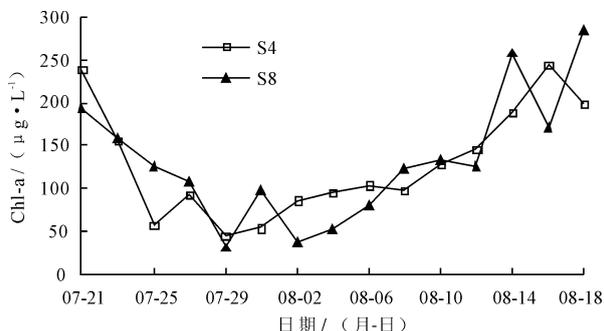


图2 调水前后河道 Chl-a 浓度的变化

调水后,两个监测点位 Chl-a 浓度均有较大程度的下降,说明调水对巢湖城市河道的浮游植物生物量产生了一定程度的抑制作用。但是调水后约 2 周,Chl-a 浓度开始逐步回升,在调水 20 d 后浮游植物生长迅速,甚至超过调水前的水平,这是由于调水后一定时间的滞水环境适宜于蓝藻的快速增殖。可

见,在目前的水力设施基础上,调水对浮游植物生长的抑制仅在调水后的一定时间段内产生作用,其主要机制可能在于调水的冲刷和稀释作用,水体紊动对浮游植物生长的抑制作用尚不能完全体现。因此,根据水动力模型的计算结果,对现有的河道进行疏浚,并实施引排结合和充分利用水位差实现自流的调水模式尤为必要,不仅能够保障河道水体较为长期的流动,而且能够发挥调水的最大效益,改善水体水质和有效地抑制蓝藻的增殖。

3 结 语

(1)以水动力模型和水质模型为主要工具,结合水动力对浮游植物影响的相关理论,得到了最优的调水周期,提出了合理的涵闸工程改造与科学的引排结合的措施。调水能显著增强封闭城市河道的水动力条件,调水后河道平均流速均大于 0.10 m/s,高于浮游植物生长临界流速;以改善水质为目标,夏季河道的换水频率应不低于 21 d。

(2)通过一次调水试验表明,模型的计算结果比较合理,在目前河道水力设施的基础上,调水实现了短期的活水目标,是改善河道水质的重要措施;调水对蓝藻生长的抑制机制主要在于冲刷和稀释作用,水体紊动对浮游植物生长抑制的作用效果未完全体现。

(3)建议相关部门对现有的河道进行疏浚,通过实施引排结合和充分利用水位差实现自流的调水模式,不仅能够保障河道水体相对长期的流动,而且能够发挥调水的最大效益,改善水体水质和有效地抑制蓝藻的增殖。

参考文献:

- [1] 黄远东,代静,陈林兴,等. 上海青浦城区西北片河网引清调水的研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(2): 14-17.
- [2] Arthington A H, Pusey B J. Flow restoration and protection in Australian rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5-6): 377-395.
- [3] Mitrovc S M, Chessman B C, Bowling L C, et al. Modelling suppression of cyanobacterial blooms by flow management in a lowland river [J]. River Research and Applications, 2006, 22(1): 109-114.

- [4] 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[J]. 中国水利,2010(4): 53-55.
- [5] 马超,练继建. 人控调度方案对库区支流水动力和水质的影响机制初探[J]. 天津大学学报,2011,44(3): 202-209.
- [6] Paerl H W, Huisman J. Climate. Blooms like it hot[J]. Science, 2008, 320(5872): 57-58.
- [7] 陈瑞弘,李飞鹏,张海平,等. 面向流量管理的水动力对淡水藻类影响的概念机制[J]. 湖泊科学,2015,27(1): 24-30.
- [8] 李飞鹏,陈玲,张海平,等. 巢湖市河流表层沉积物重金属污染和风险评价[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(12): 1852-1856.
- [9] 钱海平,张海平,于敏,等. 平原感潮河网水环境模型研究[J]. 中国给水排水,2013,29(3): 61-65.
- [10] Li Feipeng, Zhang Haiping, Zhu Yiping, et al. Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake [J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 64-71.
- [11] 哈希公司. 水质分析实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2009.
- [12] 傅建文,张庆强,王立亚,等. 引滦输水污染物特征及对于桥水库水质影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5): 151-154.

(上接第29页)

- intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 夏军,刘春蓁,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(1): 1-12.
- [3] 陈梦熊. 西北干旱区水资源与第四纪盆地系统[J]. 第四纪研究,1997,17(2): 97-104.
- [4] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(2): 152-164.
- [5] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近50年气候变化特征与趋势[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(1): 99-102.
- [6] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志,2013,32(5): 1283-1291.
- [7] 雷江群,黄强,畅建霞,等. 渭河流域气候要素演变特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5): 1-5.
- [8] Adina - Eliza Croitoru, Adrian Piticar, Carmen Sofia Dragotă, et al. Recent changes in reference evapotranspiration in Romania [J]. Global and Planetary Change, 2013, 111: 127-132.
- [9] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京: 中国水

利水电出版社,2008.

- [10] 周园园,师长兴,范小黎,等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(1): 1361-1369.
- [11] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(4): 503-509.
- [12] 黄小燕,张明军,贾文雄,等. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展,2011,22(2): 151-159.
- [13] 李万寿,陈爱萍,李晓东,等. 大通河流域水资源外调及其对生态环境的影响[J]. 干旱区研究,1997,14(1): 8-16.
- [14] 马宁,王乃昂,王鹏龙,等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. 自然资源学报,2012,27(6): 975-989.
- [15] 刘超,秦毅,邓娜. 黄河上游主要干支流近期降水、径流统计特征变化分析[J]. 水土保持学报,2004,18(1): 96-99.
- [16] 刘勤,严昌荣,张燕卿,等. 近50年黄河流域气温和降水量变化特征分析[J]. 中国农业气象,2012,33(4): 475-480.