

基于 MIKE11 的污染河流水质改善最佳方案研究

熊鸿斌, 陈雪

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 选择合肥市“西南生态补水”重点工程涉及水域十五里河为研究对象, 针对氨氮和总磷这两个主要污染物指标, 基于 MIKE11 构建水动力水质耦合模型, 模拟分析不同补水方案下的水质改善效果。结果表明, 当河道上游祁门路桥下(补水点1)的补水流量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、中游京台高速桥下(补水点2)和杨前村下河道(补水点3)的补水流量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 对河流的水质改善效果最佳, 氨氮和总磷浓度的下降率分别为 75.45% 和 68.28%, 可使 50% 以上的河段达到地表水 V 类标准, 为污染河流的治理提供了新思路。

关键词: 污染河流; 水质改善; 补水; MIKE11 模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0061-05

Exploration of the Optimal Scheme for Improving Water Quality of a Polluted River Based on MIKE11

XIONG Hong-bin, CHEN Xue

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A model of hydrodynamic and water quality was established to predict the main pollutants containing ammonia nitrogen and total phosphorus based on MIKE11. Effect of water quality improvement was simulated under different water recharge schemes in Shiwuli River, which was in the key project of “Southwest Ecological Water Replenishment” in Hefei City. The results showed that the best improvement effect of water quality was achieved when the water supply rates of recharge point 1, 2 and 3 were $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ and $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ respectively. Decrease rate of ammonia nitrogen and total phosphorus was 75.45% and 68.28%, and 50% of the river segments reached the class V standard of surface water, which provided new ideas for the treatment of polluted rivers.

Key words: polluted river; water quality improvement; replenishment; MIKE11 model

城市内河具有水源供给、沿线景观调节及防洪排涝等多种功能,是城市环境的重要组成部分,但近年来快速的城市化进程使得我国的内河水域生态环境状况越来越严峻,水质严重污染。目前国内外主要的解决方案有生态修复^[1]、水质净化^[2]、水源补给^[3]等。其中补水是改善河流水质的有效辅助措施,而水质模型是模拟补水效果的常用方法,目前应用较广泛的水质模型有 WASP、QUAL、SMS、MIKE 等^[4-6]。但应用 MIKE11 模型中的水动力模块和对流扩散模块研究污染内河治理的报道在国内尚不多

见。鉴于此,笔者以合肥市“西南生态补水”重点工程涉及水域十五里河为研究对象,选取天鹅湖坝下至巢湖入口希望桥断面为模拟河段,以主要污染因子氨氮和总磷为模拟指标,应用 MIKE11 模型的水动力模块和对流扩散模块构建水动力水质耦合模型,模拟分析污染内河的水质改善效果,以期为类似的城市内河水污染治理提供参考。

1 研究区域概况

1.1 研究范围

十五里河位于合肥市西南方,发源于大蜀山,经

过高新区、政务区和包河区,最终汇入巢湖,是合肥市西南部重要的行洪通道。十五里河全长约 35 km,流域面积达 111.25 km²,属于巢湖一级入湖支流。此次研究区域为天鹅湖以下至巢湖入口之间的汇水区域。

1.2 流域现状水质

根据 2015 年十五里河水质监测数据,水质为劣 V 类,主要污染物是氨氮和总磷。十五里河自天鹅湖以下至巢湖入口全长 26 km,是合肥市“西南生态补水”重点工程的涉及水域,其水质要求达到 V 类水质标准。实际监测数据显示,十五里河的氨氮和总磷浓度均值分别为 9.42、0.73 mg/L,相对于 V 类水质标准分别超标了 3.71 和 0.82 倍。

2 水动力水质耦合模型

MIKE11 是由丹麦水资源和水环境研究所研发的一维河道、河网综合模拟软件,本研究应用其水动力和对流扩散模块建立十五里河的水动力水质耦合模型。其中,水动力模块是基于动量守恒方程和垂向积分,用一维非恒定流圣维南方程组来模拟河流、河口的水流特征状态,按顺序交替布置水位点和流量点,采用 Abbot 六点隐式差分格式求解;对流扩散模块是在水动力模块生成的水力条件基础上,对河流中的溶解性和悬浮性物质的一维对流扩散方程进行求解模拟。

3 模型构建

3.1 河网概化

河网概化的基本原则是能够反映天然河网的水力特性,并且与实际河网输水及调蓄能力要保持一致。根据十五里河的实际情况和模型的计算模式,基于十五里河的水系特征及水流状况,重点考虑主要干支流河段,对于水量小以及对河网影响不大的河段不予考虑。

研究区域河段的污染源主要是点源污染和面源污染,其中,点源污染主要包括城市生活污水、工业废水和沿线存在的排污口,沿线工业企业的直排污水量为 $5\,967.05 \times 10^4$ m³、氨氮为 46.01 t、总磷为 49.11 t,城镇生活污水直排量为 $2\,190 \times 10^4$ m³、氨氮为 362.75 t、总磷为 34.89 t。面源污染主要包括农村生活污染、农业面源污染和城市地表径流,根据 2015 年环境统计数据及其他相关资料计算,2015 年随地表径流汇入到十五里河段的氨氮和总磷分别为 85.78 和 12.68 t。

3.2 模型的率定

3.2.1 水动力模块

依据 2015 年水文数据,应用试错法对研究区十五里河水动力模型进行率定,其中需要率定的曼宁系数即为河床的粗糙度,率定结果表明,与上边界距离分别为 0、2 009、3 926、10 743 m 时,曼宁系数分别为 0.024、0.024、0.022、0.021。

对比分析水位的实测与模拟数据,得到希望桥断面水位实测值与模拟值的相关系数为 0.737,当相关系数在 0.6 以上时,说明模拟结果较为精确^[6],模型参数的选取较为合理,模型可准确反映水动力变化过程。

3.2.2 对流扩散模块

对流扩散模块中需要率定的参数为氨氮和总磷的扩散系数以及衰减系数。率定后的扩散系数取值为 8 m³/s,且在模型的率定过程中校核准确;衰减系数则由相关文献^[6-8]中的推荐值进行率定,率定结果表明,与上边界距离分别为 0、2 009、3 926、10 743 m 时,氨氮的衰减系数分别为 0.045、0.060、0.070、0.065 d⁻¹,总磷的衰减系数分别为 0.050、0.055、0.027、0.018 d⁻¹。

选择希望桥断面为模型的验证断面,用 2015 年氨氮的实测值与模拟值进行对比,结果表明:氨氮的模拟值和实测值的相关系数为 0.925,模拟结果较为精确,模型的参数选取较为合理,并且能够准确反映水质变化过程。

4 情景模拟与分析

根据十五里河的地理位置、地质特点以及方案的可达性,针对主要污染因子氨氮和总磷,采取补水措施改善水质,对补水方案进行模拟分析,探究不同补水位置和补水流量对十五里河水质的改善效果。

4.1 治污前水质模拟

为研究综合治理措施对十五里河水质的改善情况,并与情景模拟下的治理效果进行对比,需了解十五里河的现状水质。本研究选择水质最差的 8 月份进行对比,从研究区上边界至下边界希望桥断面,十五里河流量为 2.73 m³/s 左右,和 V 类水质标准相比,氨氮和总磷浓度全线超标,其中氨氮最大浓度为 25.6 mg/L、超标了 11.8 倍,总磷最大浓度为 2.13 mg/L、超标了 0.52 倍,水质污染非常严重。

4.2 补水位置

所研究的十五里河段有两个补水来源,一是通

过蜀山分干渠补涔河干渠来水,二是位于巢湖边的生态补水厂。蜀山分干渠来水可通过管道直接补充至河道上游祁门路桥下(补水点 1,见图 1)。经分析比较,生态补水厂可设两条补水路线,分别对应两个补水点(补水点 2 和 3,见图 1):一是利用已建成的塘西河生态补水管线,将水输送至锦绣大道与玉龙交口后,新建一根 DN1 000 管道至十五里河中游的京台高速桥下河段,新建管道长度约为 3 km;二是从紫云路与上海路交口已建成的塘西河补水管线处新建一根 DN1 000 管道沿紫云路往东送水至杨前村下河道,新建管道长度约为 3 km,这两个补水点所需新建管线的投资基本相同。

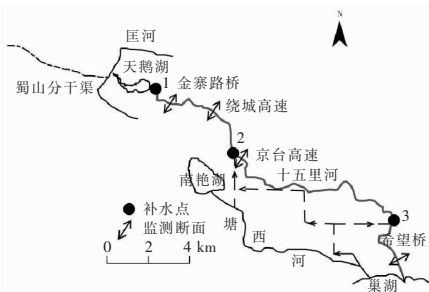


图 1 补水点分布示意

Fig. 1 Distribution of replenishment points

蜀山分干渠补水的氨氮和总磷浓度分别为 0.17、0.02 mg/L,巢湖生态补水厂补水的氨氮和总磷浓度分别为 1.2、0.36 mg/L。十五里河 8 月的本底流量约为 $2.73 \text{ m}^3/\text{s}$,当补水流量为河流本底流量的 10% 时补水效果最好^[9],因此进行模拟试验时,补水流量取 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$,连续补给 30 d,采用 3 种补水方案(方案 1:对补水点 1 进行补水;方案 2:对补水点 1 和 2 进行补水;方案 3:对补水点 1、2 和 3 进行补水),模拟不同方案的补水效果,结果见图 2。可知,方案 1 中,氨氮和总磷浓度相比补水前均有所下降,氨氮的平均浓度降低了 3.32 mg/L,下降率为 26.56%;总磷的平均浓度降低了 0.27 mg/L,下降率为 20.11%。在方案 2 中,从 3 km 左右至 4 km 处氨氮浓度明显上升,说明这段有生活污水排入,之后氨氮浓度缓慢下降且在 8 km 处趋于平缓,平均浓度降低了 4.41 mg/L,下降率为 35.31%;总磷浓度在 4 km 左右有明显下降趋势,平均浓度降低了 0.43 mg/L,下降率为 32.02%。在方案 3 中,相较于另两种方案,补水点 3 处的氨氮和总磷浓度在 8.4 km 后均有下降趋势,平均浓度分别降低了 4.61 和 0.47

mg/L,下降率分别为 36.92% 和 34.63%。相比较而言,污染物下降率由小到大依次是方案 1、方案 2、方案 3,说明多点补水的水质改善效果更佳。由于补水水质较好,污染物浓度得到稀释,再加上河流的自净能力,从而使得十五里河的水质得到改善。

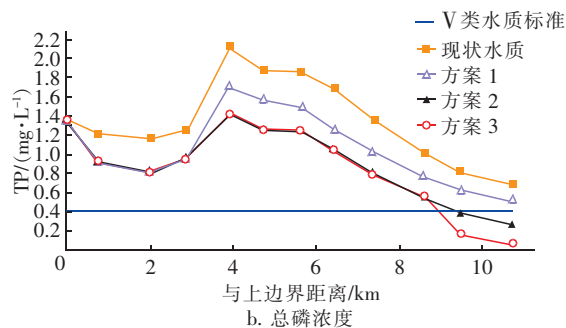
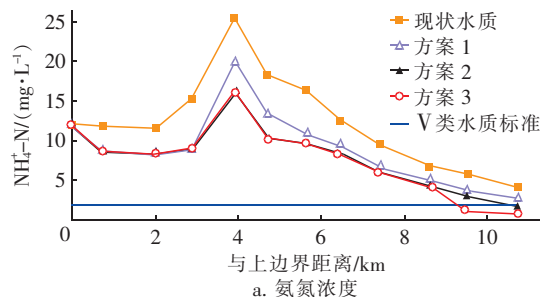


图 2 不同补水方案对河道污染物浓度的影响

Fig. 2 Impact of replenishment on pollutants concentration of Shiwuli River

4.3 补水流量

根据以上研究发现,尽管采用多点补水会降低污染物浓度,使河道水质得到改善,但在研究区十五里河沿线氨氮和总磷浓度依然很高,有 80% 的河段水质不达标,故对不同的补水流量($0.3 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$)进行研究,在补水点 1 连续补水 30 d,模拟补水效果,结果见图 3。可知,当补水流量为 0.5 和 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,氨氮和总磷浓度在 0~2 km 段逐渐下降,之后缓慢上升并在 4 km 处达到峰值,之后逐渐下降并最终趋于平缓,氨氮平均浓度降低了 6.05 和 7.87 mg/L,下降率分别为 48.50% 和 63.08%;总磷的平均浓度降低了 0.62 和 0.75 mg/L,下降率分别为 45.68% 和 64.86%。当补水流量为 0.9 和 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,氨氮和总磷浓度在 0~2 km 段下降迅速,而后逐渐上升又缓慢下降并最终趋于平稳,氨氮平均浓度降低了 7.78 和 8.09 mg/L,下降率分别为 62.32% 和 55.05%;总磷的平均浓度降低了 0.67 和 0.69 mg/L,下降率分别为 49.79% 和 50.71%。

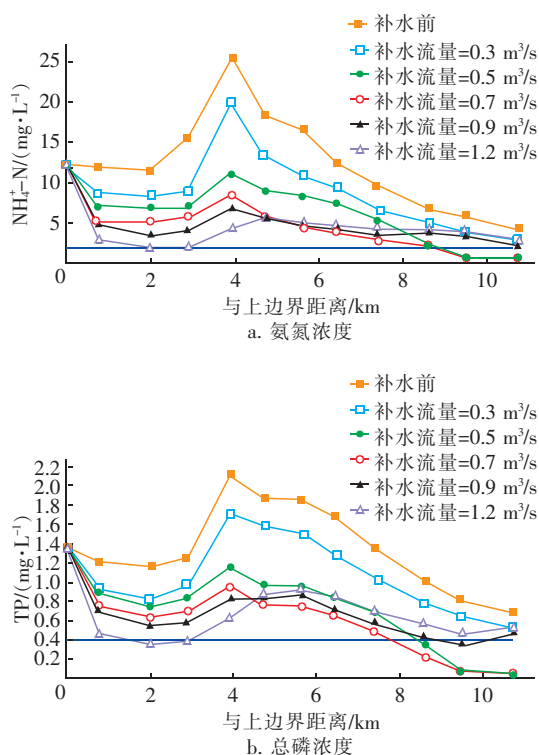


图3 不同补水流量对河道污染物浓度的影响

Fig. 3 Impact of replenishment flow on pollutants concentration of Shiwuli River

在5种不同补水流量工况下,污染物下降率由小到大分别为 $0.3 \text{ m}^3/\text{s} < 0.5 \text{ m}^3/\text{s} < 1.2 \text{ m}^3/\text{s} < 0.9 \text{ m}^3/\text{s} < 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$,当补水流量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水质改善效果最佳,但由于沿线有生活污水排入,导致大部分水质仍然没有达到V类水质标准。当补水流量较大时,水体污染负荷也较大,导致水体的自净能力减弱,水质改善效果变差。另外,当补水流量为 0.3 和 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,虽然补水所带来的污染负荷较小,但流量较小使得在自然河流流速条件下和上游带来的污染负荷下搅拌能力差,不能完全混合,对河流的扰动较小,导致水质改善效果不理想。

4.4 补水方式

根据以上研究发现,当补水流量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,对十五里河的水质改善效果最佳,但是十五里河大部分河段水质仍然不达标。在研究过程中发现,当补水流量为 0.9 和 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,在距上边界 $0 \sim 3 \text{ km}$ 处,氨氮浓度下降率为 59.93% 和 70.23% ,总磷浓度为 43.66% 和 55.35% ,补水流量越大,对距上边界 $0 \sim 3 \text{ km}$ 河段的水质改善效果就越好,这主要是因为补水点1的补水水质优于补水点2和3;由于补水点2和3的补水水质为IV类水,在增大

补水流量的同时,河段的中下游污染物浓度也相应升高。鉴于此,研究不同的补水方式,方案一:补水点1处的补水流量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$,补水点2和3处的补水流量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$;方案二:补水点1和2的补水流量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$,补水点3的补水流量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$;方案三:3处补水点的补水流量均为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模拟连续补水30 d的水质改善效果,结果见图4。

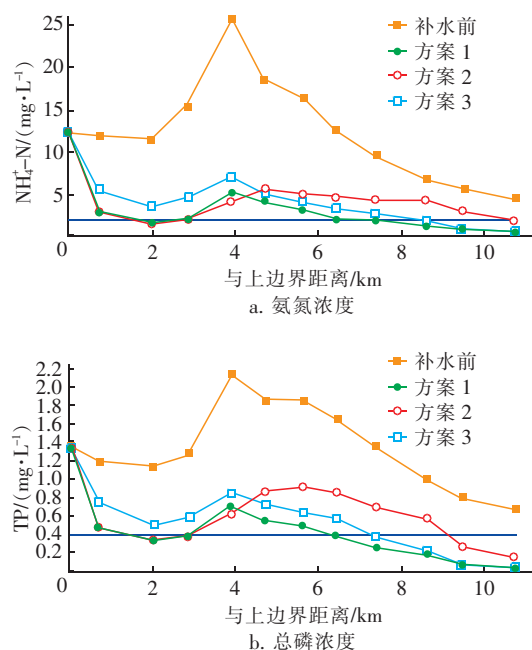


图4 不同补水方式对河道污染物浓度的影响

Fig. 4 Impact of replenishment method on water pollutants concentration of Shiwuli River

由图4可知,方案1中,氨氮和总磷浓度在 $0 \sim 3 \text{ km}$ 段迅速下降至V类水质标准,之后稍有升高又明显下降并最终趋于平缓,氨氮平均浓度降低了 9.41 mg/L 、下降率为 75.45% ,总磷平均浓度降低了 0.93 mg/L 、下降率为 68.28% 。在方案2中,氨氮和总磷浓度在 $0 \sim 3 \text{ km}$ 段迅速下降,之后有所上升又缓慢下降并最终趋于稳定,氨氮和总磷平均浓度分别降低了 8.27 和 0.74 mg/L ,下降率分别为 66.27% 和 56.19% 。在方案3中,氨氮和总磷平均浓度分别降低了 8.39 和 0.81 mg/L ,下降率分别为 67.26% 和 59.49% 。比较3种方案,方案1对十五里河的水质改善效果最佳,可使50%的河段达标。

5 结论

基于MIKE11模型中的水动力模块和对流扩散模块建立十五里河的水动力水质耦合模型,模拟分析不同补水方案的水质改善效果。结果表明,当补

水点 1 的补水流量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、补水点 2 和 3 的补水流量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,对河道的水质改善效果最佳,可使氨氮和总磷的平均浓度分别降低 9.41 和 0.93 mg/L ,下降率分别达到 75.45% 和 68.28%,使得 50% 以上的河段达到地表 V 类水质标准。通过 MIKE11 模型可以确定污染河流最佳补水方案,为其他污染河流的治理提供了新思路。

参考文献:

- [1] 蔡鲁祥,范昱,章黎笋,等. 杭州市余杭塘河支流的水环境生态修复[J]. 中国给水排水,2015,31(10): 99-102.
Cai Luxiang, Fan Yu, Zhang Lisun, *et al.* Ecological remediation of tributary of Yuhang Tang River in Hangzhou[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10): 99-102(in Chinese).
- [2] 郑西强,陈云峰. 高效除磷硅藻土用于城市景观水体的治理[J]. 中国给水排水,2012,28(5): 32-35.
Zheng Xiqiang, Chen Yunfeng. Application of effective phosphorus removal diatomite to urban landscape water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(5): 32-35(in Chinese).
- [3] 张帆. 福州市台江区内河补水方案探讨[J]. 中国给水排水,2015,31(12): 25-27.
Zhang Fan. Discussion on water replenishment schemes for inland river in Fuzhou Taijiang District[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(12): 25-27(in Chinese).
- [4] 王洪秀,袁佐栋,武周虎,等. 武河人工湿地工程去除 COD 效果及 WASP 模拟[J]. 中国给水排水,2014,30(11): 69-72.
Wang Hongxiu, Yuan Zuodong, Wu Zhouhu, *et al.* COD removal efficiency and application of WASP model to Wuhe constructed wetland[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(11): 69-72(in Chinese).
- [5] 胡琳,卢卫,张正康. MIKE11 模型在东茗溪水源水质预警及保护的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(1): 28-36.
Hu Lin, Lu Wei, Zhang Zheng kang. Application of MIKE11 model in water quality early-warning and protection in Dong Tiaoxi water source[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(1): 28-36(in Chinese).
- [6] 童朝锋,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).
- [7] 张亚丽,申剑,史淑娟,等. 淮河支流污染物综合降解系数动态测算[J]. 中国环境监测,2015,31(2): 64-67.
Zhang Yali, Shen Jian, Shi Shujuan, *et al.* Dynamic change of the river pollutions' composite degradation coefficient in Huaihe River's tributary[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(2): 64-67(in Chinese).
- [8] 吕菲菲,单楠,马天海,等. 多闸坝河网水系 TMDLs 计算模型构建及应用[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2016, 52(1): 96-102.
Lü Feifei, Shan Nan, Ma Tianhai, *et al.* Buildup of TMDLs model for river networks with multi-sluices and its application[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2016, 52(1): 96-102(in Chinese).
- [9] 熊鸿斌,陈雪,张斯思. 基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5063-5073.
Xiong Hongbin, Chen Xue, Zhang Sisi. Method of improving the water quality of polluted rivers based on the MIKE11 model[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5063-5073(in Chinese).



作者简介:熊鸿斌(1963-),男,安徽合肥人,博士,教授,主要研究方向为水污染处理技术。

E-mail: xhb6324@sina.com

收稿日期:2018-07-12