

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.014

基于 MIKE11 的合流制截流倍数优化

熊鸿斌, 冯晨潇

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章以安徽阜阳市界首市界临河为例,以化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)和氨氮为指标,按照排放的污水水质、污染物质量浓度差异,将研究区域划分为工业区、居民区、城中村 3 个区域,采用取最值法,将区域内溢流口概化为连续恒定的污染源,并设计分质截流倍数,建立 MIKE11 水动力水质模型;从降低河流中污染物质量浓度、提升动态水环境容量 2 个方面,对比分质截流与传统截流的截流效果。结果表明:采用传统截流倍数时,界临河中河长制断面处, ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 分别降低 28%、25%;采用分质截流倍数时, ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 分别降低 39%、32%;在 COD 和氨氮的动态水环境容量方面,分质截流比传统截流分别提升 30%、16%,可见分质截流对河流水质改善效果优于传统截流。研究结果可为老城区截流式合流制排水系统改造提供参考。

关键词:MIKE11 模型;分质截流;水环境容量;截流倍数

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)03-0371-07

Study on optimal selection of interception ratio based on MIKE11 confluence system

XIONG Hongbin, FENG Chenxiao

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

Abstract: Taking the Jielin River in Jieshou City, Fuyang area as an example, this paper uses chemical oxygen demand(COD) and ammonia nitrogen as indicators, and divides the study area into industrial area, residential area and urban village according to the sewage water quality and pollutant concentration. A single rainfall event with a rainfall intensity greater than 1 is studied, the maximum value method is used to generalize the overflow in the area as a continuous and constant pollution source, the quality-based interception ratios are designed, and the MIKE11 hydrodynamic water quality model is established. From the two aspects of reducing pollutants in the river and increasing the dynamic water environmental capacity, the interception effects of quality-based interception and traditional interception are compared. The results show that when the traditional interception ratios are used, ρ_{COD} and $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ at the river chief system section of Jielin River are reduced by 28% and 25%, respectively; when the quality-based interception ratios are used, ρ_{COD} and $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ decrease by 39% and 32%, respectively. In terms of the dynamic water environmental capacity of COD and ammonia nitrogen, the quality-based interception increases by 30% and 16%, respectively, compared with the traditional interception. It can be concluded that the effect of the quality-based interception on river water quality improvement is better than that of the traditional interception. The study can provide reference for the selection of the interception ratio of confluent drainage system in old urban areas.

Key words:MIKE11 model; quality-based interception; water environmental capacity; interception ratio

收稿日期:2021-04-25;修回日期:2021-05-13

基金项目:水污染防治重大科学技术计划资助项目(2015ZX07204-007)

作者简介:熊鸿斌(1963—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

对于老城区排水系统改造,在直排式合流制转换为截流式合流制排水系统的过程中,截流倍数的选择设计是至关重要的^[1-3]。截流倍数 n_0 取值过小将造成大量污染物溢流入受纳水体、河流污染加剧; n_0 取值过大,虽然会降低河流污染程度,但是会带来因截流干管变大、污水处理厂负荷增加造成的处理成本和经济费用增大等问题^[4-6]。因此,选择合理截流倍数是源头治理的关键。

针对合流制排污口截流倍数的选择,文献[7]研究改进暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),以最大单位投资环境效益为优化目标,选择最佳截流倍数;文献[8]采用将污水量转化成基准降雨强度的方法来确定合理的截流倍数。河流中的污染物质量浓度和水环境容量大小最能反映截流倍数选择是否合理,借助 MIKE11 模型可以对其进行研究分析。文献[9]应用 MIKE11 模型分析水库中污染物变化特征,并预测污染物垂向变化分布特征趋势;文献[10]利用 MIKE11 模型通过预测氨氮质量浓度变化,分析排污口排放方式对河流中污染物质量浓度变化的影响;文献[11]运用 MIKE11 模型对动态水环境容量进行更加精确的计算分析。

本文利用 MIKE11 模型可模拟河流污染物变化、进行动态水环境容量计算等优势,针对研究区域排污口排放的污水水质、污染物质量浓度的不同,提出分质截流;以安徽阜阳地区界首市界临河为例,将整体研究区域分为不同子区域,并选择各个子区域内的分质截流倍数,通过 MIKE11 模型模拟河流污染物质量浓度变化,对动态水环境容量进行模拟计算,对比分析分质截流与传统截流的优劣,为改进与优化传统截流提供新思路。

1 研究区水质现状与分质截流设计

界临河位于安徽省界首市,全长 5.2 km,发于颍河,自北向南,止于界首南站。根据调查与监测数据,界临河 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 分别超出 V 类水质标准约 1.45 倍、1.05 倍,可确定界临河中化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)和氨氮为主要污染物。界临河无明显支流,其对应的水系如图 1 所示。

分质截流倍数是在传统截流倍数基础上改进而来的。传统截流倍数是指合流制排水系统在降雨时截流的雨水量与旱流污水量的比值,其计算公式为:

$$n_0 = \frac{Q_{\text{总}} - Q_{\text{溢总}}}{Q_{\text{旱总}}} \quad (1)$$

其中: n_0 为整个研究区域传统截流倍数; $Q_{\text{总}}$ 为区域雨污总量; $Q_{\text{溢总}}$ 为区域溢流总量; $Q_{\text{旱总}}$ 为旱季污水总量。

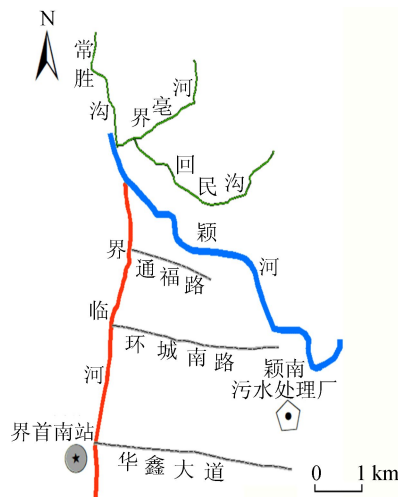


图 1 界临河水系分布示意图

考虑到污水处理厂负荷、排污口排放的污水水质差异,为优先将污染物质量浓度较高的污水截走,充分挖掘污水处理厂处理能力,最大限度保护受纳水体,本文选用分质截流倍数的方法,其示意图如图 2 所示。

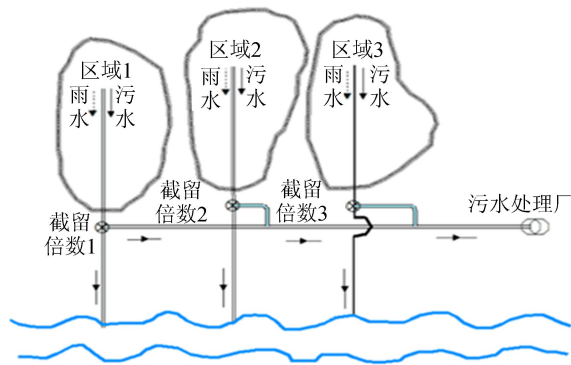


图 2 分质截流示意图

分质截流倍数设计选择的步骤如下:

(1) 根据研究区域排放的污水水质、水量不同,将其分为 m 个不同子区域,各个溢流口和区域进行一一对应。

(2) 为最大限度保护受纳水体,选择降雨强度 $P > 1$ 时降雨量为 51.2 mm 的单个降雨事件,采用最值法,将溢流口排放的污染物流量与质量浓度按此次降雨事件截流 40 min 后的最大值,将溢流口概化为恒定点源。

(3) 分别计算不同区域对应的截流倍数,即分质截流倍数^[12-13],计算公式为:

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{Q_{1\text{总}} - Q_{1\text{溢}}}{Q_{1\text{早}}} - 1, \\ n_2 &= \frac{Q_{2\text{总}} - Q_{2\text{溢}}}{Q_{2\text{早}}} - 1, \\ &\vdots \\ n_m &= \frac{Q_{m\text{总}} - Q_{m\text{溢}}}{Q_{m\text{早}}} - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: n_m 为第 m 个区域截流倍数; $Q_{m\text{总}}$ 为第 m 个区域雨污总量; $Q_{m\text{溢}}$ 为第 m 个区域溢流量; $Q_{m\text{早}}$ 为第 m 个区域旱季排污量。

2 界临河 MIKE11 模型建立

2.1 数据准备

MIKE11 模型水动力模块中所需数据包括界临河流域图、界临河实测断面的起始距离、河床高程及上下游断面的流量、水位数据; 对流扩散模块所需数据为水质实测数据、界临河沿线排污口的水质水量; 降雨径流模块所需数据为每日降雨量和蒸发量。其中水文数据来自 2019 年安徽省水利部门、安徽省水文遥测信息中心及阜阳水文水资源局; 水质和污染源数据来自 2015—2019 年安徽省环境统计数据、安徽省生态环境厅发布的重点监控企业监测数据、界首市生态环境分局提供的规划基准年污染源普查资料等; 降雨量、蒸发量数据来自界首水文站。

2.2 模块选择与介绍

MIKE11 模型广泛应用于河流河口水体。本文采用水动力模块、降雨径流模块、对流扩散模块, 模拟研究界临河中 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 随截流倍数改变而变化的变化。模型假设如下: ① 降雨在研究区各个点降雨强度是相等的; ② 溢流口视为污染物质量浓度和流量均达峰值时的一个连续点源, 忽略界临河水位高度, 认为溢流污水均可自行流入; ③ 本研究主要探讨河流污染物随截流倍数变化的状况, 因此只考虑溢流口所在位置及排放信息。

(1) 水动力模块。该模块是基于垂向积分的动量和物质守恒方程, 模拟河流或者河口的水流状态; 采用 Abbott-Ionescu 六点隐式有限差分格式求解, 并按顺序交替计算流量和水位的方法, 对每个计算点计算不同时间的水位和流量, 计算公式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q | Q |}{C^2 AR} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中: x 为距离; t 为时间; A 为过水断面面积; Q 为流量; h 为水位; q 为旁侧入流量; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度。

(2) 对流扩散模块。该模块可模拟污染物在水体中的对流扩散过程。运行该模块, 需要确立对流扩散系数和衰减系数。对流扩散系数计算公式为:

$$D = av^b \quad (4)$$

其中: D 为扩散系数; v 为流速; a 、 b 为系数(对应操作界面的前 2 项)。衰减系数参考文献[12-13]和率定过程适当取值。

(3) 降雨径流模块。该模块通过连续计算积雪储水层、地表储水层、土壤或植物根区储水层、地下水储水层 4 个相互影响的储水层含水量来模拟产汇流过程^[14]。

2.3 模型边界

研究区上边界为界临河与颍河交汇处, 下边界为界临河尽头, 即界首南站处。水动力模型以每日流量和水位数据设置, 上边界采用流量-时间数据, 下边界采用水位-时间数据。上边界入流污染物 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 作为水质边界条件。模型边界还包括点源和面源汇入, 界临河点源为研究区内概化后的 7 个雨污合流制溢流口, 城市面源污染是在水文、气象数据基础上, 采用 MIKE11 模型降雨径流模块模拟得到。为提高模型的计算精度, 采用区域范围内或最近的雨量站即界首水文站的日降雨量和日蒸发量, 计算该流域的日均降雨量和日均蒸发量。

2.4 降雨径流模型耦合

通过输入气象数据、设置水文参数, 为水动力模型提供旁侧入流, 并将其作为来水边界, 同时为水质模型提供面源污染估算平台。降雨径流模型要求所划分的子流域中至少含有 1 个雨量站^[15-16], 而本文整个研究范围内仅有 1 个雨量站, 因此降雨径流模型只能按整体模拟。按照平衡水量调整峰值和基流顺序进行率定, NAM 降雨径流模型主要参数取值见表 1 所列。

表 1 NAM 降雨径流模型主要参数及取值

参数	取值范围	初始值	率定值
U_{max} /mm	10~25	15.0	11.5
L_{max} /mm	50~250	150	120
C_{QOF}	0~1	0.60	0.55
C_{KIF} /h	500~1 000	800	712
T_{OF}	0~1	0.40	0.48
C_{K12} /h	4~48	24	37
C_{KBF} /h	500~5 000	2 000	1 680

表 1 中: U_{\max} 为地表储水层最大含水量; L_{\max} 为根系储水层最大含水量; C_{QOF} 为地表径流系数 (overland flow runoff coefficient, CQOF); C_{KIF} 为壤中流出流时间常数; T_{OF} 为生成坡面流的根区湿度临界值; C_{K12} 为坡面流和壤中流时间常数 (time constant used in the runoff routing, CK12); C_{KBF} 为基流时间常量 (baseflow time constant, CKBF)。

2.5 模型率定与验证

2.5.1 水动力模型验证

依据 2019 年水文数据, 采用多次试错法对界临河水动力模型进行率定, 率定结果表明, 当与上边界距离分别为 0~2 009 m、2 009~5 200 m 时, 曼宁系数分别为 0.021、0.024。对界临河上边界, 选取雨水量较多的 6—8 月为研究时段, 进行流量与水位的模拟与实测, 对比结果如图 3 所示。

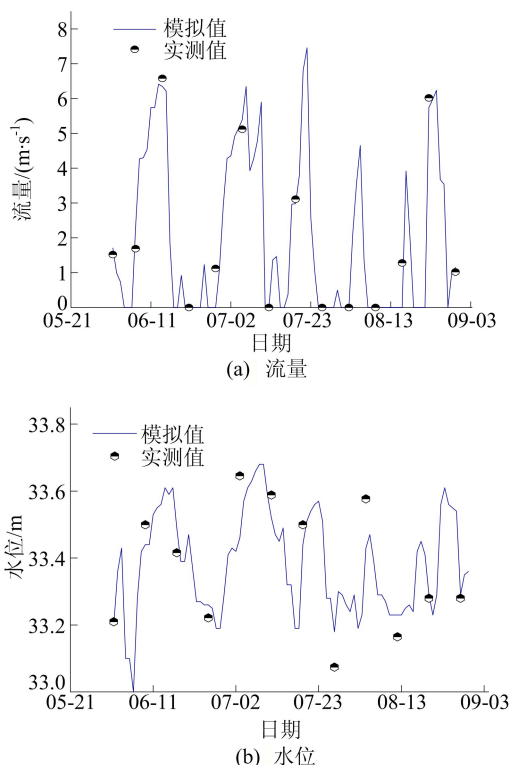


图 3 上边界截流量、下边界水位模拟值与实测值对比

由图 3 可知: 随时间变化, 界临河流量、水位也在不断变化, 上下波动较为明显; 上边界模拟流量与实测流量相对误差为 3.22%, 下边界水位相对误差为 6.31%。根据相关研究经验^[17], 当相对误差在 20% 以内, 模拟结果均可以接受, 并认为模型参数取值合理。

2.5.2 模型水质验证

该模块需要率定 COD、氨氮的扩散系数和衰

减系数, 参照文献^[18-19], 根据阜阳水文水资源局、安徽省水利部门历史资料及同步监测界临河水文水质数据, 扩散系数率定值为 $3.8 \text{ m}^2/\text{s}$, 与上边界距离分别为 0、2 009、3 926、5 000 m 时, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的衰减系数分别为 0.045、0.060、0.070、0.065 d^{-1} , ρ_{COD} 的衰减系数分别为 0.050、0.055、0.027、0.018 d^{-1} 。在界临河下游的河长制断面, 7 月 COD 和氨氮质量浓度实测值与模拟值对比如图 4 所示。

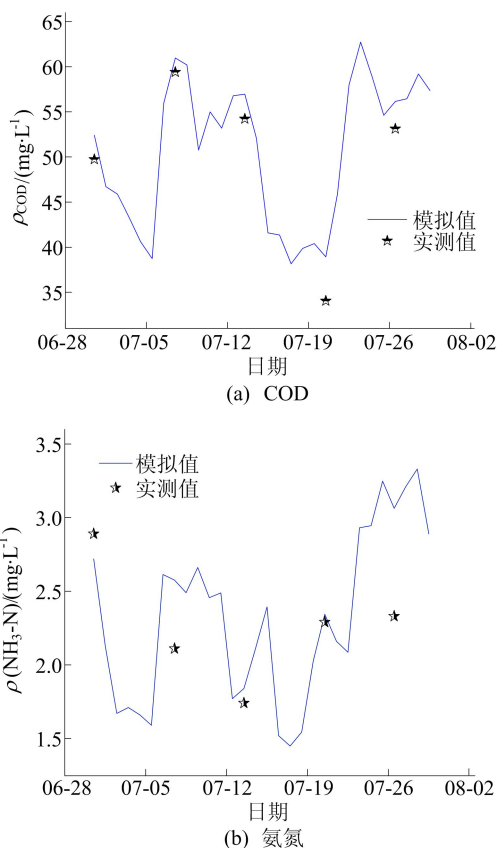


图 4 河长制断面 COD、氨氮质量浓度实测值与模拟值对比

经对比分析, COD 和氨氮的模拟结果均存在相应的误差, 误差系数分别为 12.6%、15.9%, 且实测值均小于模拟值。其原因主要是将污染源概化为连续不变的点源输入到模型中, 导致存在误差, 但误差系数小于 20%, 说明该模型模拟是可行的。

3 界临河分质截流效果研究

3.1 界临河分质截流倍数选择

选取 COD 和氨氮为主要污染物指标。根据界首市生态环境分局提供的规划基准年污染源普查资料、2019 年统计年鉴^[20] 和实地考察调研数据, 采用 ArcGIS 软件绘制界临河对应排污口位

置和子区域划分图,如图 5 所示。

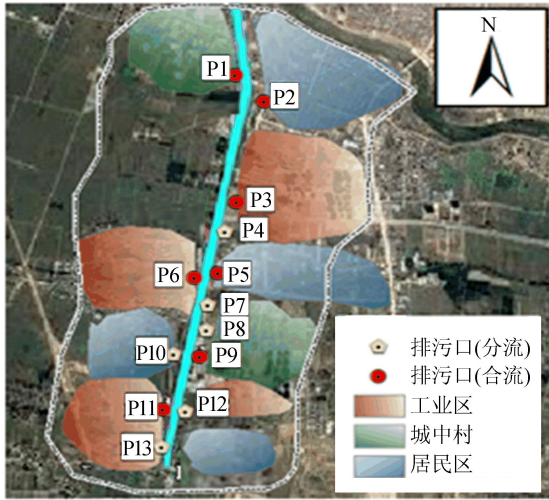


图 5 研究区排污口分布和子区域划分情形

由图 5 可知,可将研究区划分为工业区、城中村和居民区 3 个区域,共包含 7 个合流制雨污排污溢流口。由流域内界首水文站降雨信息可知,2019 年全年界临河水质在 7 月最差。因此,选择 $P>1$ 时 3 h 降雨量为 51.2 mm 的单次降雨事件为例,通过最大值法概化出 7 月的溢流口排污信息,流量、 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 按此次降雨事件截流 40 min 后的峰值计算,对应的界临河合流制排污口排污、截流污水信息见表 2 所列。

表 2 界临河合流制排污口排污、截流污水信息

排污口编号	区域	$Q_{\text{早总}}$	ρ_{COD}	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$Q_{\text{总}}-Q_{\text{溢}}$
P1	城中村	0.069	180	12	0.200
P2	居民区	0.491	150	7	1.230
P3	工业区	0.533	300	15	1.870
P5	居民区	0.611	160	8	1.520
P6	工业区	0.394	600	20	1.130
P9	城中村	0.209	120	9	0.650
P11	居民区	0.033	300	13	0.810

注: $Q_{\text{早总}}$ 、 $Q_{\text{总}}-Q_{\text{溢}}$ 的单位为 m^3/s ; ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的单位为 mg/L 。

对 3 个区域的 COD 和氨氮分别选取对应的入河系数:工业区,0.60、0.80;居民区,0.25、0.65;城中村,0.15、0.50。将表 2 数据对应带入(2)式中,可以解得: $n_{0\text{工}} = 2.5$, $n_{0\text{居}} = 1.5$, $n_{0\text{城中村}} = 2.0$ 。根据表 1 数据和(1)式,结合颍南污水处理厂处理负荷,计算得出传统截流倍数计算方法下截流倍数 $n_0 = 2.0$ 。

3.2 MIKE11 模型模拟污染物质量浓度分布

结合界临河周边污染点源、面源排污状况,模

拟 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 在界临河的分布状况,结果如图 6 所示。图 6 中, s 为到上边界的距离。

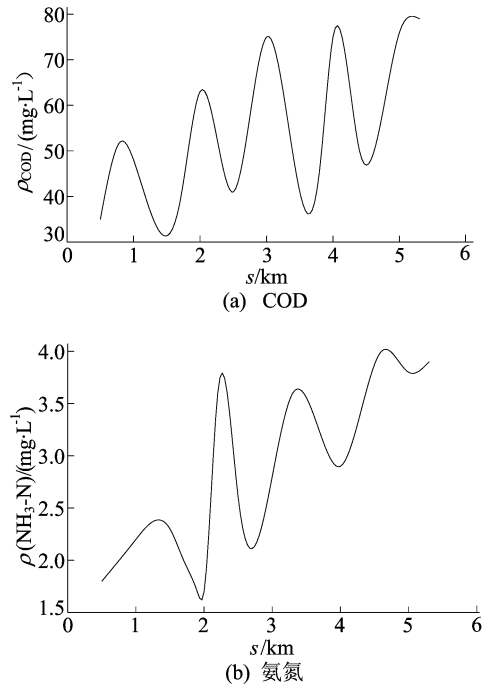


图 6 COD、氨氮质量浓度里程分布

从图 6 可以看出:随着里程增加, ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 整体呈现上升趋势;在距离上游 0.5~0.8 km、1.5~2.0 km、2.5~3.0 km、3.7~4.2 km、4.6~4.9 km 内,河流中 ρ_{COD} 呈大幅增长趋势;在 0.5~1.3 km、1.9~2.4 km、2.7~3.5 km、4.2~4.8 km 内,河流中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 呈大幅增长趋势。结合图 5 分析可知,工业区对应溢流口所在区域水体污染最严重,居民区和城中村次之。

ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 在界临河分布状况的平面图如图 7 所示。

由于本文研究对象为合流制排污口,图 7 中只标出了合流制排污口的位置,其余分流制排污口全部截流至污水处理厂,不会产生溢流污水污染水体,未在图 7 中标出。

由图 7a 可知, ρ_{COD} 从上游到下游整体呈上升趋势,其中 P1、P2 排污口附近 ρ_{COD} 较低,为 30~50 mg/L,而 P3、P5、P6、P9 和 P11 排污口附近 ρ_{COD} 为 50~75 mg/L。由图 7b 可知: $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 从上游到下游也呈上升趋势,在 P1、P2 排污口附近均较低,为 1.5~2.0 mg/L;P5、P6 较其余排污口对河流污染程度为中等,其附近为 2.0~3.0 mg/L;P3、P9、P11 对河流影响较大,排污口附近为 3.0~4.0 mg/L。

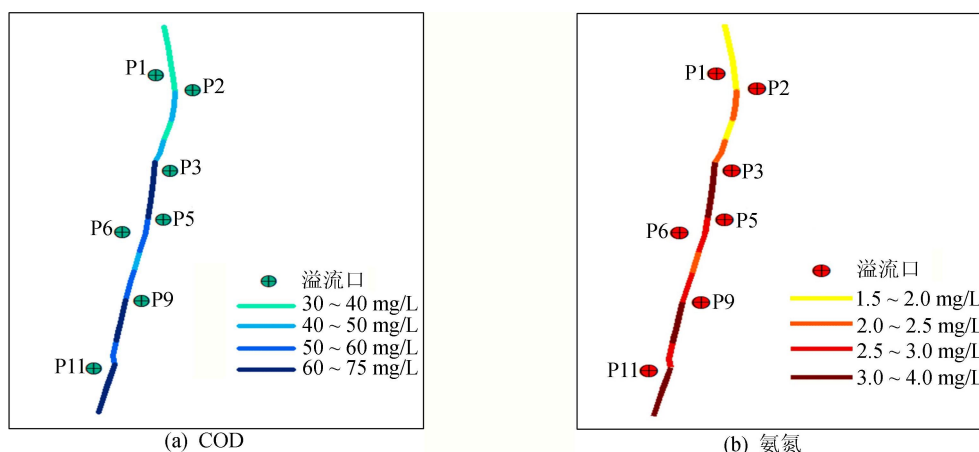


图 7 界临河治污前 COD、氨氮质量浓度空间分布

结合图 5 分析可知,工业区溢流口周围受纳水体中污染物质量浓度最高,居民区和城中村次之,说明不同区域造成的污染物排放质量浓度、流量不同。因此,选择分质截流倍数十分必要。

3.3 分质截流倍数效果对比分析

3.3.1 降低河流中污染物质量浓度方面

运用 MIKE11 模型分别模拟在分质截流倍数和传统截流倍数下,界临河河长制断面处 7 月 COD 和氨氮治理效果,结果如图 8 所示。由水文

数据及模拟结果可得:在 7 月,截流治污前 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 均值分别为 54.31、2.58 mg/L;分质截流倍数下,其均值分别为 33.24、1.74 mg/L;传统截流倍数下,其均值分别为 39.72、1.93 mg/L;分质截流倍数下,对 COD 和氨氮的削减率分别为 39%、32%,传统截流倍数下对应分别为 28%、25%。

因此,在降低河流中污染物质量浓度方面,分质截流优于传统截流。

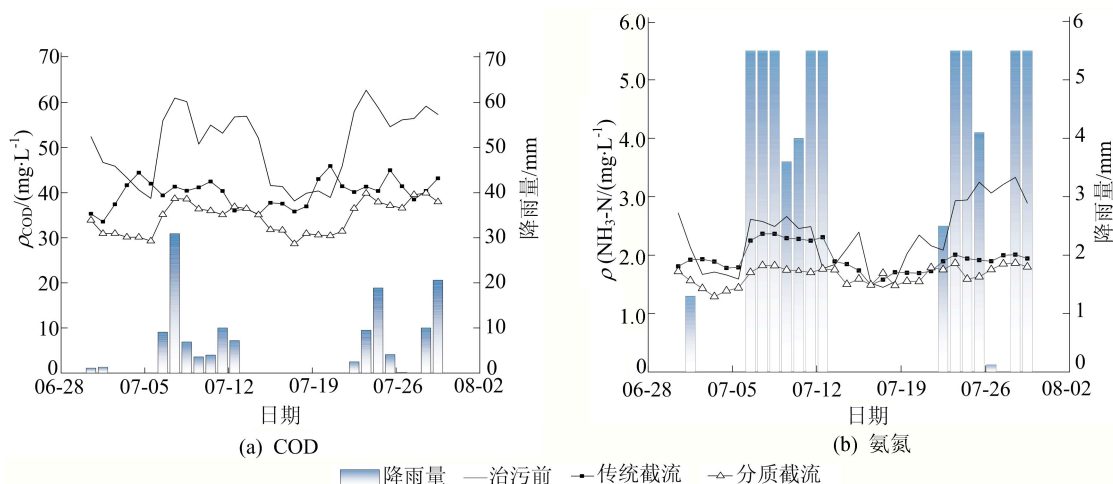


图 8 分质截流与传统截流时 COD、氨氮治理效果对比

3.3.2 动态水环境容量方面

针对本文实例,在基于 MIKE11 模型的河流水质模拟中,计算水环境容量只需考虑稀释作用污水进入河流水体后混合质量浓度,计算公式为:

$$\rho_s = \frac{Q\rho_0 + q\rho_1}{Q+q} = \frac{Q\rho_0 + W_t}{Q+q} \quad (5)$$

其中: ρ_s 为计算单元污染物水质目标质量浓度; Q 为计算流量; q 为计算单元内的污水排放量; ρ_0 为上游来水中污染物的质量浓度; ρ_1 为污水质量浓度; W_t 为计算单元水环境容量。

引入稀释流量比 $m=Q/(Q+q)$, 计算水环境容量 W_t , 计算公式为:

$$W_t = Q(\rho_s/m - \rho_{01}) \quad (6)$$

其中, ρ_{01} 为计算单元上游来水污染物的 MIKE11 模型模拟质量浓度。按照 V 类水质目标, 结合 MIKE11 模型模拟结果, 通过 (6) 式计算传统截流、分质截流时, 7 月界临河 COD 和氨氮动态水环境容量, 结果对比如图 9 所示。

由图 9 可知: 在 7 月, 采用传统截流倍数时 COD 平均水环境容量为 32.89 g/s, 而分质截流

时 COD 平均水环境容量提高约 30%;采用传统截流倍数时,氨氮平均水环境容量为 2.01 g/s,而分质截流时氨氮平均水环境容量提高约 16%;采用分质截流倍数提升河流主要污染物的动态水环境容量时,其效果大于传统截流。

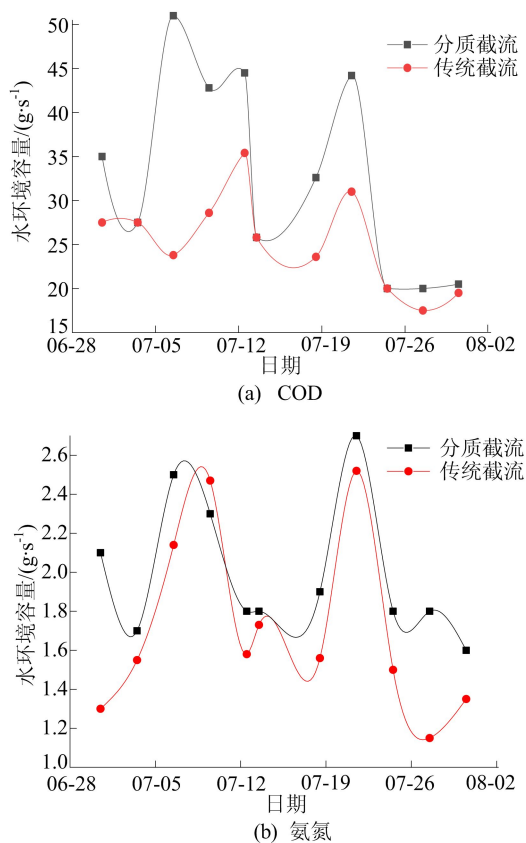


图9 7月 COD、氨氮水环境容量对比

4 结 论

(1) 采用 MIKE11 模型模拟界临河 COD 和氨氮分布可知,工业区对应的溢流口对河流污染影响最大,居民区和城中村次之。因此,各个区域污染源水质不同,采用分质截流非常必要。以降雨强度 $P>1$ 时,降雨量为 51.2 mm 的单个降雨事件为例,设计研究区域分质截流倍数分别为: $n_{0工} = 2.5, n_{0居} = 1.5, n_{0城中村} = 2.0$ 。

(2) 在降低河流中污染物质量浓度方面,分质截流和传统截流分别将界临河中 ρ_{COD} 降低 39%、32%,将 $\rho(NH_3-N)$ 降低 28%、25%,因此分质截流更能降低河流被污染的风险。

(3) 在 COD 和氨氮的动态水环境容量方面,分质截流比传统截流分别提升 30%、16%。该结果进一步表明,分质截流优于传统截流。本文研究结果可为截流倍数的选择提供新思路。

[参 考 文 献]

- [1] 张怀宇,赵磊,王海玲,等. 合流制排水系统雨季污染物溢流的截流与调蓄控制研究[J]. 给水排水,2010,36(6):42-45.
- [2] 何庆慈,李立青,孔玲莉,等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. 中国给水排水,2005,21(2):101-103.
- [3] 张超,姜应合. 合流制排水系统截流倍数优选[J]. 环境工程学报,2015,9(6):2271-2276.
- [4] 谢长焕,生喜民,张晓霞,等. 旱季污水总量暴雨强度拟合法确定合流制截流倍数[J]. 中国给水排水,2008,24(14):34-36.
- [5] 周大鹏,宋云. 合流制排水系统截流倍数分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2005,13(5):88-90.
- [6] 朱春龙. 城市水环境系统控制决策支持技术研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [7] BROWN J N, PEAKE B M. Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff[J]. Science of the Total Environment,2006,359:145-155.
- [8] 田亮,熊诗涛. 城市黑臭水体污染源分析及整治[J]. 人民黄河,2020,42(2):116-120.
- [9] NGUYEN T T, KEUPERS I, WILLEMS P. Conceptual river water quality model with flexible model structure[J]. Environmental Modelling & Software,2018,104:102-117.
- [10] 熊鸿斌,张斯思,匡武,等. 基于 MIKE11 模型入河污染源处理措施的控制效能分析[J]. 环境科学学报,2017,37(4):368-376.
- [11] 熊鸿斌,张斯思,匡武,等. 基于 MIKE11 模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究[J]. 自然资源学报,2017,32(8):1422-1432.
- [12] 吴春笃,袁广娇,解清杰,等. 城市合流制管网分质截流模型的构建[J]. 中国给水排水,2014,30(9):81-84.
- [13] 王文远. 污水截流工程中截流倍数选择的研究[J]. 给水排水,1997,31(10):24-26.
- [14] 熊鸿斌,陈雪. 基于 MIKE11 的污染河流水质改善最佳方案研究[J]. 中国给水排水,2019,35(3):61-65.
- [15] 吴天蛟,杨汉波,李哲,等. 基于 MIKE11 三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(2):51-57.
- [16] 张淑敏. 基于森林作用的流域降雨径流模型研究[D]. 泰安:山东农业大学,2012.
- [17] 唐玉兰,郭小刚,王雅峰. 基于 MIKE11 的降雨径流对浑河沈抚段水质影响的研究[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第2卷). 南京:中国环境科学学会,2020:407-413.
- [18] 王淑梅,王宝贞,曹向东,等. 对我国城市排水体制的探讨[J]. 中国给水排水,2007,23(12):16-21.
- [19] ZHANG W, ZHANG S C, WAN C, et al. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall[J]. Environmental Pollution,2008,153:594-601.
- [20] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴:2019 [M]. 北京:中国统计出版社,2019:11. 1-11. 31.

(责任编辑 张淑艳)