

高广灿, 孙宇, 聂泽宇, 等. 不同排水体制下枣阳市某片区管网入河污染负荷及排水能力模拟评估[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 158-165.
GAO G C, SUN Y, NIE Z Y, et al. Simulation and assessment of pollutant load entering rivers and drainage capacity of pipe networks in a certain area of Zaoyang City under different drainage systems[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 158-165.

不同排水体制下枣阳市某片区管网入河污染负荷及排水能力模拟评估

高广灿, 孙宇, 聂泽宇, 成昌良, 孔宇*

(南京市市政设计研究院有限责任公司, 江苏南京 210018)

摘要 【目的】为评估湖北省枣阳市行政密集区管网在不同排水体制下的入河污染负荷及排水能力,【方法】利用 InfoWorks ICM 模型建立了该片区“管网-河道”耦合模型,并采用多工况进行模拟。【结果】模拟结果表明,合流制排水体制对受纳河道的污染冲击最大,其中居民生活污水产生的污染负荷占比达到 90% 以上,而截流式合流制(源头)和完全分流制下排入受纳水体的污染负荷相差不大,但截流式合流制(源头)通过截流管收集到污水厂的水量是完全分流制的 4.4 倍,达到 363.77 万 m^3 ;采用重现期分别为 1、3、5、10 年,共 4 种工况作为降雨条件驱动,3 种排水体制下该片区管网设计重现期均以 <3 年为主,占比均达到 50% 以上,排水能力不足的管段主要集中在书院街、人民路以及中兴大道。【结论】相比现状合流制,源头截流和完全分流制下全年污水入河化学需氧量(COD_{Cr})总量大大减小,后面两者排水体制下排入受纳水体的污染负荷以及对应的管网排水能力相差不大,但源头截流相对于完全分流将大大增加污水厂无效工作负荷。结合枣阳城区实际发展情况以及对受纳水体的影响程度,建议该地区近期采用截流式合流制(源头)改造模式,远期可逐步实现完全分流制模式。

关键词 InfoWorks ICM 污染负荷 排水体制 管网排水能力 耦合模型

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)02-0158-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.018

Simulated and Assessment of Pollutant Load Entering Rivers and Drainage Capacity of Pipe Networks in a Certain Area of Zaoyang City under Different Drainage Systems

GAO Guangcan, SUN Yu, NIE Zeyu, CHENG Changgen, KONG Yu*

(Nanjing Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

Abstract [Objective] To evaluate the pollution load and drainage capacity of the administrative dense area pipeline network in Zaoyang City, Hubei Province, under different drainage systems, [Methods] an InfoWorks ICM model was used to establish a "pipeline channel" coupling model in this area, and simulated under multiple operating conditions. [Results] The simulation results showed that the combined drainage system had the greatest impact on the pollution of the receiving river, with more than 90% of the pollution load generated by residential sewage. However, the pollution load discharged into the receiving water body under the interception combined system (source) and the complete diversion system was not significantly different. The amount of water collected by the interception combined system (source) through the interception pipe to the wastewater treatment plant (WWTP) was 4.4 times that of the complete diversion system, reaching 3.6377 million m^3 . Using four operating conditions with return periods of 1, 3, 5 years and 10 years, respectively, as rainfall conditions, the design return period of the pipeline network in this area was mainly <3 years under the three drainage systems, accounting for more than 50%. The pipeline sections with insufficient drainage capacity were mainly concentrated on Shuyuan Street, Renmin Road, and Zhongxing Avenue. [Conclusion] Compared to the current combined flow system, the total chemical oxygen demand (COD_{Cr}) of wastewater entering the river throughout the year is greatly reduced under the source interception and complete diversion systems, the pollution load discharged into the receiving water body and the corresponding drainage capacity of the

[收稿日期] 2024-01-05

[作者简介] 高广灿(1991—),男,硕士,研究方向为水污染控制、智慧水务模型构建,E-mail:396656386@qq.com。

[通信作者] 孔宇(1978—),男,正高级工程师,硕士,研究方向为水环境治理及市政排水技术,E-mail:10891226@qq.com。

pipeline network under the drainage systems of the latter two were not significantly different. However, compared to complete diversion, source interception will greatly increase the ineffective workload of the WWTP. Based on the actual development situation of Zaoyang urban area and the degree of impact on the receiving water bodies, this paper suggests that the area should adopt interception combined system (source) in the near future, and gradually achieve the complete diversion system mode in the long term.

Keywords InfoWorks ICM pollution load drainage system drainage capacity of pipe network coupling model

城市会产生大量由生活污水、工业废水和天然雨水组成的废水。其中,工业废水和生活污水含有大量有害物质和多种细菌,不妥善处理,将严重污染环境,危害人民身体健康。而雨水若不能及时排除也会造成城市内涝。因此,为了创造一个良好的生活和生产环境,必须完善城市排水系统的改进,对废水进行合理地收集、输送、处理、利用和排放。合流制排水系统作为主要的排水系统之一,在我国和世界其他地区都是普遍存在的^[1]。2014年城镇排水统计资料显示,我国合流制管网的总体占比约为25%^[2]。但在降雨发生时,雨水与污水混合,有发生合流制溢流污染的可能^[3]。在这样的背景下,排水管网雨污分流工程作为城市环境污染防治的重要措施和有效途径在全国各地实施起来。

国内学者针对城市排水排涝和雨污分流等领域开展了广泛的研究。程小文等^[4]利用 InfoWorks ICM 来指导合流制溢流调蓄池设计,综合考虑了管网存储容量、峰值溢流量和下游水厂或泵站的排水能力等影响因素,提出了调蓄池容量计算的新方法。薛鹏腾等^[5]利用 SWMM 对分流制系统径流污染的调蓄设施进行优化设计。蔡慧野等^[6]利用

InfoWorks ICM 研究降雨径流量对污水系统运行的影响。周紫蕊等^[7]利用 Info Works ICM 耦合城市水文模型与河网水动力模型以评估河道满溢风险。由此可见,InfoWorks ICM 在研究城市排水系统升级改造,指导给排水工程施工设计领域有着广泛的应用。

鉴于枣阳市城市建设的不断发展,市区居住人口数量逐年上升以及下垫面发生了较大的变化,原有的城市排水系统已无法满足水环境保护及雨季排涝要求的现状。本文基于 InfoWorks ICM 模型建立了枣阳市东冷水沟片区的管网河道耦合模型,对该片区现状的合流制,及工程实施后的截流式合流制(源头)和完全分流制,共3种排水体制进行分析。模拟评估该片区管网在3种排水体制下的污染负荷及排水能力,为排水管网的改造、地块规划建设提供科学依据。

1 研究区域概况

枣阳市地处湖北省西北部,鄂豫两省交会处,汉水与唐白河汇合处东部,属汉水流域。枣阳中心城区现状排水系统以沙河为界大致可分为城北片区与城南片区,而东冷水沟片区(A5)为城南系统的其中一个,如图1所示。该排水片区服务面积约为



图1 枣阳市中心城区排水分区

Fig. 1 Drainage Zoning of Downtown Zaoyang City

742 hm² (1 hm² = 10 000 m²), 是枣阳市政府、环保局、规划局等行政密集区。

该排水片区现状是合流制, 雨污水收集到合流管后, 就近排入城市内河—东冷水沟, 在东冷水沟最下游汇入外河—沙河的交界处设有截流装置。本文对受纳水体的研究仅为城市内河。因此, 认为现状排水体制为一般合流制。现状的东冷水沟沦为雨污水通道, 已不能满足人们日常生活的水环境要求。另外, 城市下垫面变化巨大, 导致原市政合流管道无法满足雨季排涝需求, 管网排水能力不足。

2 研究方法内容

2.1 研究方法

本文采用 InfoWorks ICM 模型进行研究, InfoWorks 系列模型是由英国环境部推出的, ICM 模型是 InfoWorks 系列的综合流域排水模型系统, 它可以将一维排水管网模型、二维洪涝模型和河道水力模型同城市流域完整耦合。国内应用较为广泛, 应用结果表明, 该模型具有较高的精度和可靠性。

2.2 数据资料

对收集的现状管网测绘资料、设计院新增设计管线资料、《枣阳污水专项规划(2018—2030)》、遥感影像数据进行综合分析。对排水管网数据进行拓扑关系和纵断面检查, 简化支管和部分节点, 保证管网上下游连接、埋深、坡度等方面的合理性^[8]。

2.3 研究内容

本文对该片区现状合流制, 及工程实施后的截流式合流制(源头)和完全分流制, 共 3 种排水体制进行分析^[9]。截流式合流制(源头)指的是新建市政污水管, 原有市政合流管作为雨水管使用, 地块内部仍是合流制, 通过地块合流系统末端截流装置进行雨污分流。完全分流制指的是地块内部和市政道路同时进行雨污分流, 市政道路新建污水管部分与截流式合流制(源头)保持一致, 采用设计院提供的施工图资料。具体研究内容包括: (1) 3 种不同排水体制下, 片区市政管网排水能力分析; (2) 3 种不同排水体制下, 片区管网入河污染物对东冷水沟的污染负荷影响分析。

2.4 模型建立

2.4.1 建模基本情况

本次建模结合枣阳市中心城区地形、人口聚集

区、管网、道路等实际情况进行管网和汇水分区的概化。地形数据采用 30 m×30 m 精度的 DEM 图像数据, 图像显示建模范围内东南地势高, 西侧地势低。管网建模概化时管位完全按照现状管网和设计新建管网图纸, 对检查井节点进行适当简化, 减少不必要的建模工作量。最终将现状排水系统概化为 1 406 个节点、62.2 km 管网, 将改造后排水系统概化为 2 546 个节点、92.9 km 管网。由于缺少小区内部管网测绘资料, 本次污水子汇水区划分是结合遥感影像及市政道路管网测绘资料, 对居住小区和污水预留支管进行匹配, 人工手动进行识别划分的, 共划分出 138 个。雨水子汇水区划分是 ICM 模型按照泰森多边形规则进行的自动划分^[10], 共划分出 803 个。

2.4.2 设计降雨

本次研究设计降雨采用长历时和短历时两种。长历时降雨数据采用枣阳气象局提供的 2022 年全年小时降雨量数据, 用于研究 3 种不同排水体制下污染负荷的影响, 如图 2 所示。

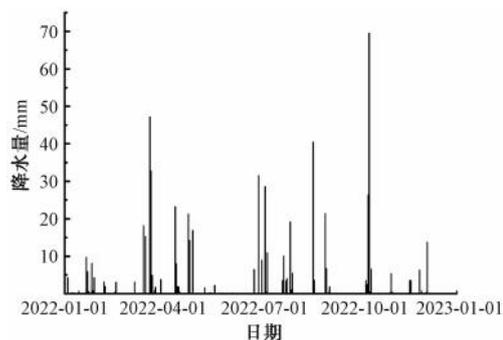


图 2 枣阳市 2022 年全年降雨过程

Fig. 2 Annual Rainfall Process of Zaoyang City in 2022

短历时降雨数据采用当地气象部门公布的暴雨强度公式, 如式(1)。

$$q = \frac{7\,839.62(1 + 0.841\lg P)}{(t + 31.481)0.963} \quad (1)$$

其中: q ——暴雨强度, L/(s·hm) (1 hm = 100 m);

P ——重现期, 年;

t ——降雨历时, min。

本次研究采用的重现期分别为 1、3、5、10 年, 采用的降雨历时为 120 min。

2.4.3 模型参数设置

生活污水参数的设置参考《枣阳市污水专项规划

(2018—2030)》以及《全国污染源普查手册》,具体是居民人均排水量 170 L/d,化学需氧量(COD_{Cr})质量浓度为 435 mg/L。地表污染物累积冲刷参数采用 ICM 中自带的“Innovyze”模块推荐值^[11]。研究区域下垫面分为 3 种类型,分别是硬化不透水地面、透水绿地以及水面^[12]。结合汇水分区结果和遥感影像数据,采用“ATO”面积提取工具根据数字化的不透水面积测量数据,进而自动为每个子集水区计算产流表面面积。计算划分结果为:硬化不透水地面占比为 87.69%;透水绿地占比为 10.51%;水面占比为 1.80%。根据相关文献^[13-14]及模型手册,初步确定模型初始参数,同时结合研究区域的综合径流系数,进行参数率定,调整初始参数数值,最终参数取值如表 1 所示。

表 1 下垫面产汇流参数
Tab. 1 Rainfall-Run off Parameters of Underlying Surface

下垫面类型	径流模型	径流系数	汇流模型	汇流参数
硬化地面	Fixed	0.75	SWMM	0.015
绿地	horton	-	SWMM	0.2
水面	Fixed	1	SWMM	-

3 结果与讨论

3.1 管道排水能力分析

基于 InfoWorks ICM 模型,采用重现期分别为 1、3、5、10 年的降雨对管网水力模型进行模拟^[15]。降雨历时采用 120 min,但为了模拟管网水位变化的完整过程,模拟时长设置为 12 h。不同排水体制下的管道总长度及排水能力结果如图 3 所示。

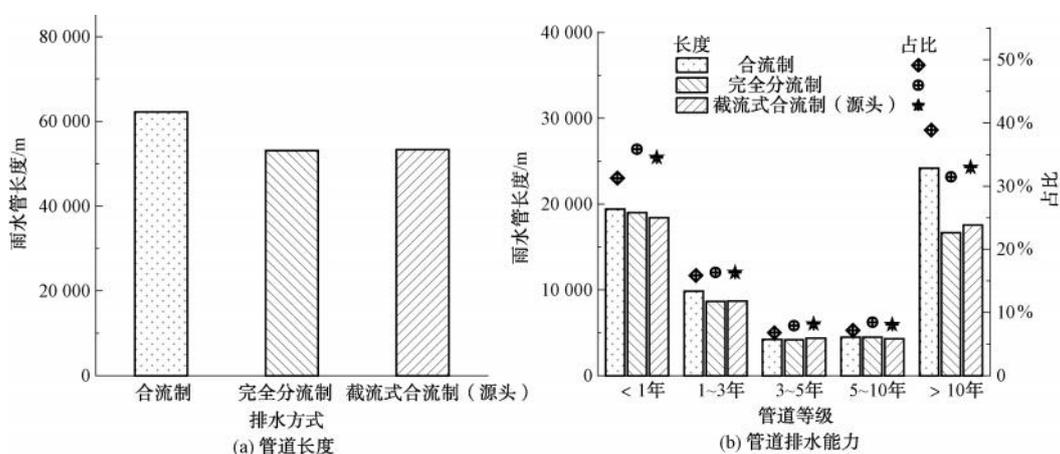


图 3 雨水管道长度及排水能力

Fig. 3 Rainwater Pipeline Length and Drainage Capacity

由图 3 可知,截流式合流制(源头)和完全分流制下雨水管道总长度与现状合流制下雨水管道总长度相差不多,但分流制下将新建市政污水管。因此,改造后管道总长度将显著长于合流制下的管道总长度。现状合流制下,排水管网设计重现期以<3 年为主,占比达到 47.12%。本次模拟的管网改造工程是新建市政污水管部分,雨水系统部分沿用现状合流管。因此,进行雨污分流改造后,对管网的排水能力提升不大,进行源头截流后设计重现期<3 年占比为 50.82%,重现期<3 年的管线占比增加了 3.7%。完全雨污分流和源头截流相比较,对管网整体的排水能力提升意义不大,但源头截流时会有大量雨水进入污水系统,2022 年全年约有 281.13 万 m³ 雨水混入,给下游污水厂运行造成过多的负担。

对 3 种排水制下管网排水能力进行空间分析。

管道排水能力分布情况如图 4 所示。由图 4 可知,3 种排水体制下研究片区管网排水能力分布差距不大,排水能力不足的管段主要集中在书院街中段、人民路的中段和南段以及中兴大道的南段。结合管线测绘情况分析,这是由于书院街东段地面坡段较大,管线坡度也较大,但中段地面坡度较缓,管线坡度也随之放缓,造成暴雨时中段排水能力不足。人民路排水能力不足的原因跟书院街类似,此外,人民路东侧雨水管道汇水范围较大,雨水管径略有不足。中兴大道南段排水能力不足是由于存在大管接小管以及排向人民路,上游管网排水受下游管网水位顶托而排水不畅。

以区域 A(图 1)为例介绍,图 5 为在 5 年一遇的重现期下,区域 A 处雨水排口及污水管道流量变化曲线。区域 A 处的雨水排口流量和污水干管流

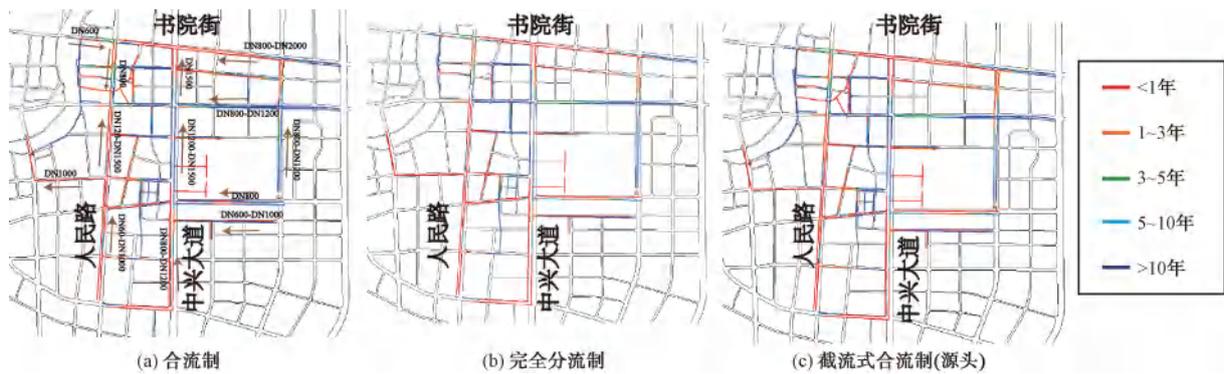


图4 管道排水能力分布

Fig. 4 Distribution of Pipeline Drainage Capacity

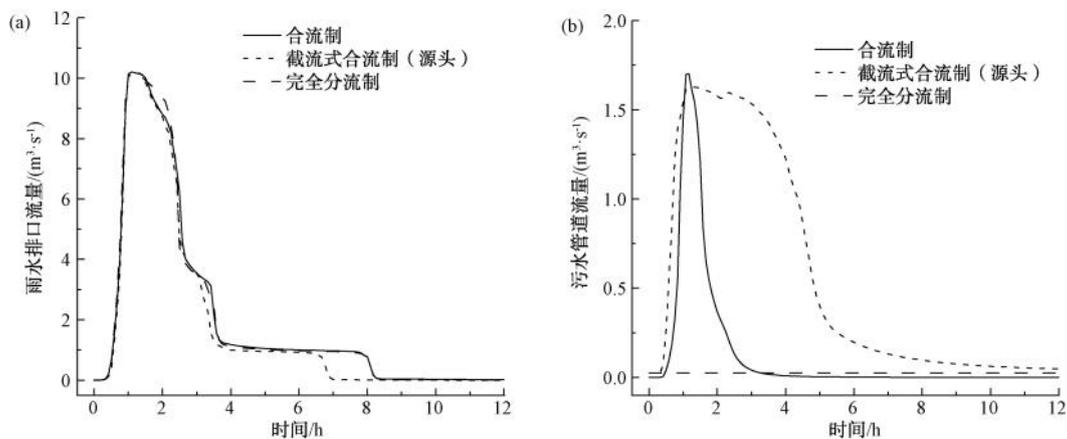


图5 区域A 流量变化曲线

Fig. 5 Variation Curve of Flow in Region A

量在降雨前期都迅速增加,随着降水结束流量逐步减小。不同排水体制下,雨水排口流量呈现相似的规律,随着降水的结束阶梯式减少,这与降水量的增加以及管道排水能力的限制有关。而3种排水体制下,区域A处排污管道流量变化规律差异明显,从中可以看出不同排水体制的显著区别。具体来看,合流制下,排污管道流量与降雨进程接近,随着降雨流量增加,随后迅速减小。截流式合流制(源头)情况下,排污量减少缓慢,与合流制相比有一定的时间滞后性,雨量越大,流量减小速度越缓慢。完全分流制情况,排污管道流量保持平稳,不受降雨影响。

3.2 管道污染负荷分析

本研究3种排水体制情况下,合流制、截流式合流制(源头)和完全分流制,污染负荷来源不同,合流制下污染负荷主要来自于居民生活污水以及城市降雨地表径流,截流式合流制(源头)下污染负荷主要来自于合流制溢流污染^[16]以及城市降雨地表径

流,完全分流制下污染负荷主要来自于城市降雨地表径流。本次研究利用构建的管网河道耦合模型,以 COD_{Cr} 作为代表性污染物,对入河排口水质进行模拟。研究区域现状共有13个雨污直排口,改造工程后共有13个雨水排口以及5个溢流排口。

结果表明,现状合流制下,全年排入东冷水沟的 COD_{Cr} 总量为334.74 t,其中居民生活污水入河 COD_{Cr} 为313.08 t,占比达到93.53%。截流式合流制(源头)下,假设污水厂不对截污干管进行干预,全年排入东冷水沟的 COD_{Cr} 总量为21.19 t,其中合流制溢流污染入河 COD_{Cr} 为2.23 t,占比达到10.52%。截污干管截流 COD_{Cr} 总量为365.36 t,截流水量达到363.77万 m^3 。完全分流制下,全年排入东冷水沟的 COD_{Cr} 总量为21.66 t,污水管收集区域 COD_{Cr} 总量为359.32 t,收集污水量为82.64万 m^3 。综上,合流制对受纳水体的冲击最大,其中居民生活污水产生的污染负荷占比达到90%以上;截

流式合流制(源头)和完全分流体体制下,排入受纳水体的污染物及收集到污水厂的污染总量基本相同,但污染物浓度不同,收集到污水厂的水量相差较大,截流式合流制(源头)收集到污水厂的水量是完全分流制的4.4倍。这是因为源头截流情况下,过多的雨水随着污水收集进入污水厂,从而大大增加污水厂无效工作负荷。

图6为在5年一遇的重现期下,区域A处雨水排口及污水管道COD_{Cr}浓度变化曲线。不同排水体制下区域A处的雨水排口COD_{Cr}浓度在降雨后1h内都有先增大后减小的趋势,这与初雨带来的地表径流污染有关。在不同降雨重现期情况下,雨水排口COD_{Cr}浓度呈现相似的变化规律。而不同排水体制下,雨水排口COD_{Cr}浓度变化规律差异明显,合流制情况下,区域A处雨水排口初雨COD_{Cr}

质量浓度达到45 mg/L左右,在降雨结束后,COD_{Cr}浓度会迅速升高,这是因为地表径流汇集结束后,该排口以排放污水为主。而完全分流制与截流式合流制(源头)相比,在初雨阶段,由于截流式合流制(源头)下的智能截流井作用,排口的初雨COD_{Cr}质量浓度峰值在35 mg/L左右,完全分流制下排口的初雨质量浓度峰值在50 mg/L左右。这2种排水体制下雨水排口COD_{Cr}在降雨后都趋于稳定,变化甚微。污水干管中COD_{Cr}在合流制与源头截流情况下,变化规律类似,但降雨结束4h后,源头截流的COD_{Cr}浓度会逐渐高于合流制,逐步恢复至生活污水浓度水平。而完全分流制情况下,污水干管COD_{Cr}浓度远超其他2种排水体制的COD_{Cr}浓度,且COD_{Cr}浓度不随降雨的大小而改变。

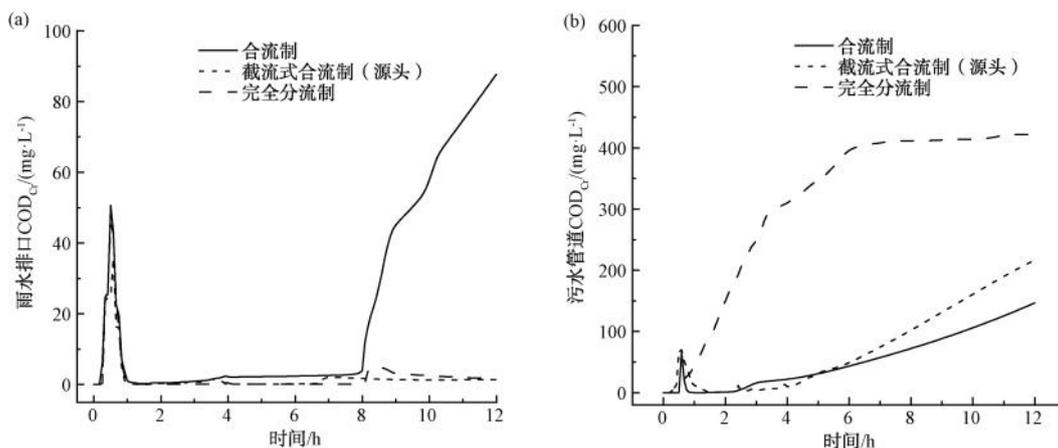


图6 区域A处COD_{Cr}变化曲线

Fig. 6 Variation Curve of COD_{Cr} at Region A

4 结论

本文基于InfoWorks ICM构建河道管网耦合模型,对该片区现状的合流制及工程实施后的截流式合流制(源头)和完全分流制,共3种排水体制进行模拟,分别评估了受纳水体的污染负荷以及4种重现期设计暴雨下的管网排水能力,为今后枣阳城区的地块管网改建工作提供参考。

主要结论如下。

(1)3种排水体制相比,合流制对受纳水体的冲击最大,其中居民生活污水产生的污染负荷占比达到90%以上,而截流式合流制(源头)和完全分流制下排入受纳水体的污染负荷相差不大,从该层面考虑,进行完全雨污分流的意义不大。

(2)片区完全分流制下全年收集污水量为82.64万m³,而截流式合流制(源头)通过截流管收集到污水厂的水量是完全分流制的4.4倍,会增大污水处理厂的资源浪费以及运行负担,从该层面考虑,进行完全雨污分流的意义较大。

(3)结合枣阳城区实际发展情况以及对受纳水体的影响程度,本文建议该地区近期采用截流式合流制(源头)改造模式,远期可逐步实现完全分流制模式。

(4)由于雨污分流改建工程沿用现状合流管作为雨水管,3种排水体制下的管网排水能力相差不大,排水管网设计重现期均以<3年为主,占比均达到50%以上。排水能力不足的管段主要集中在书

院街、人民路以及中兴大道,原因多为管线陡坡接缓坡、大管接小管以及部分管径不足。

(5)现状合流制下,全年污水排入东冷水沟 COD_{Cr} 总量为 334.74 t,截流式合流制(源头)下,全年污水排入东冷水沟 COD_{Cr} 总量为 21.19 t,而完全分流制下,全年污水排入东冷水沟 COD_{Cr} 总量为 21.66 t。合流制对受纳水体的冲击最大,截流式合流制(源头)和完全分流对入河污染物的削减作用近乎相同。

参考文献

- [1] WERF J A, KAPELAN Z, LANGEVELD J. Real-time control of combined sewer systems: Risks associated with uncertainties [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128900. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128900.
- [2] 中国城镇供水排水协会. 城镇排水统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
China Urban Water Association. Urban drainage statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2014.
- [3] GIAKOUMIS T, VOULVOULIS N. Combined sewer overflows: Relating event duration monitoring data to wastewater systems' capacity in England [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2023, 9(3): 707-722.
- [4] 程小文,凌云飞,李丹,等. InfoWorks ICM 模型在合流制溢流调蓄池设计中的应用研究 [J]. *给水排水*, 2019, 45(s1): 64-67.
CHENG X W, LING Y F, LI D, et al. Application research of InfoWorks ICM model in the design of combined overflow storage tanks [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(s1): 64-67.
- [5] 薛鹏腾,毛立波,张峰,等. 基于质量冲刷曲线和多属性决策的分流制控污调蓄设施的优化设计 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 127-132.
XUE P T, MAO L B, ZHANG F, et al. Optimization design of diversion system pollution control and storage facilities based on quality erosion curve and multi-attribute decision-making [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 127-132.
- [6] 蔡慧野,王卿,朱宇珂. 降雨径流量增加对杨公堤污水系统运行的影响 [J]. *净水技术*, 2020, 39(6): 158-160, 166.
CAI H Y, WANG Q, ZHU Y K. Effect of rainfall runoff increase on operation of Yanggongdi sewage system [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(6): 158-160, 166.
- [7] 周紫蕊,廖卫红,雷晓辉,等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析——以福州市仓山区龙潭阳岐片区为例 [J]. *南水北调与水利科技*, 2023, 21(4): 770-779.
ZHOU Z R, LIAO W H, LEI X H, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 770-779.
- [8] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝过程模拟 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 109-117.
LIAO R T, XU Z X, YE C L, et al. Simulation of urban rainstorm and waterlogging process based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 109-117.
- [9] 李秋红,刘广兵,岳强,等. 以海陵城北区为例浅析城镇排水体制的选择 [J]. *四川环境*, 2023, 42(6): 196-202.
LI Q H, LIU G B, YUE Q, et al. Take Hailin North District as an example to analyze the selection of urban drainage system [J]. *Sichuan Environment*, 2023, 42(6): 196-202.
- [10] 言铭,魏忠庆,黄永捷,等. 汇水区划分对 InfoWorks ICM 水力模拟结果的影响 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(1): 111-117.
YAN M, WEI Z Q, HANG Y J, et al. Impact of catchment division on InfoWorks ICM hydraulic simulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(1): 111-117.
- [11] 赵宁睿. 城市面源污染负荷计算与防控措施探讨——以昆明为例 [J]. *净水技术*, 2021, 40(s2): 71-75.
ZHAO N R. Discussion on urban surface pollution load calculation and prevention and control measures——Case of Kunming [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(s2): 71-75.
- [12] 臧翀,黄树杰,王维康,等. 基于 Infoworks ICM 模型在荔枝湖截污系统截流能力评估中的应用 [J]. *给水排水*, 2021, 47(s1): 152-155.
ZANG C, HUANG S J, WANG W K, et al. Application of Infoworks ICM in evaluation of intercepting capacity of Lizhi lake sewage interception system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(s1): 152-155.
- [13] 王丽晶,潘兴瑶,王俊文,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的北京市东城区海绵城市改造效果分析与研究 [J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(9): 43-48.
WANG L J, PAN X Y, WANG J W, et al. Analysis and research on the transformation effect of sponge city in Dongcheng District of Beijing based on infoworks ICM model [J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(9): 43-48.
- [14] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析——以福州市白马河片区为例 [J]. *北京师范大学学报*, 2021, 57(6): 784-793.
YE C L, XU Z X, LEI X H, et al. InfoWorks ICM flood simulation and risk analysis: Case of Baima River District, Fuzhou [J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2021, 57(6): 784-793.

- [15] 刘华超, 梁风超, 徐薇, 等. 基于 Infoworks ICM 的城市排水(雨水)系统排水能力及内涝风险评估[J]. 城市道桥与防洪, 2021, 20(12): 71-74.
LIU H C, LIANG F C, XU W, et al. Evaluation on drainage capacity and waterlogging risk of urban drainage (rainwater) system based on Infoworks ICM [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021, 20(12): 71-74.
- [16] BOTTURI A, OZBAYRAM E G, TONDERA K. Combined sewer overflows: A critical review on best practice and innovative solutions to mitigate impacts on environment and human health [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021, 51(15): 1585-1618.
-
- (上接第 147 页)
- [2] WANG K X, WEI T T, LI Y N, et al. Flocculation-to-adsorption transition of novel salt-responsive polyelectrolyte for recycling of highly polluted saline textile effluents[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 43: 127410. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127410.
- [3] 刘琪, 雷培树, 余琴芳, 等. 工业废水难降解有机物深度处理技术与设计综述[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 34-45.
LIU Q, LEI P S, YU Q F, et al. Review on advanced treatment technology and design for refractory organic compounds in Industrial wastewater[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 34-45.
- [4] MALIK S N, GHOSH P C, VAIDYA A N, et al. Hybrid ozonation process for industrial wastewater treatment: Principles and applications; A review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 35: 101193. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101193.
- [5] 张艺, 彭蕾, 李丽, 等. 响应面法优化油菜籽荚填料吸附柱对水溶液中铜离子的处理条件[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 132-141.
ZHANG Y, PENG L, LI L, et al. Optimization of treatment conditions for copper ions in aqueous solution by rapeseed pod filler adsorption column using response surface methodology[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 132-141.
- [6] 毕艳艳, 姜佳峰, 孙绍明, 等. Box-Behnken Design 响应面法优化银杏叶提取物醇提水沉工艺[J]. 中国药业, 2024, 33(7): 59-64.
BI Y Y, JIANG J F, SUN S M, et al. Optimization of ginkgo biloba leaf extract alcohol extraction and water precipitation process using Box-Behnken Design response surface methodology [J]. China Pharmaceuticals, 2024, 33(7): 59-64.
- [7] 段越, 罗学刚. 制药废水的响应面法优化 O₃/Fe-C 微电解预处理工艺[J]. 净水技术, 2023, 42(2): 109-116.
DUAN Y, LUO X G. Optimization of O₃/Fe-C microelectrolysis pretreatment process for pharmaceutical wastewater using response surface methodology [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2): 109-116.
- [8] 郑雪婷, 叶露. 响应面法优化微电解工艺处理 PNP 废水 [J]. 建筑与预算, 2020(6): 45-50.
ZHENG X T, YE L. Optimization of microelectrolysis process for PNP wastewater treatment using response surface methodology [J]. Construction and Budget, 2020(6): 45-50.
- [9] 彭灿, 丁宁, 周静, 等. 响应面法优化 Fenton 工艺处理反渗透浓缩液 [J]. 应用化工, 2018, 47(5): 966-969, 973.
PENG C, DING N, ZHOU J, et al. Optimization of Fenton process for concentrated landfill leachate of reverse osmosis by response surface methodology [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(5): 966-969, 973.
- [10] 刘雪敏. 响应面法优化荷叶中生物碱提取的研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2019.
LIU X M. Optimization of alkaloid extraction from lotus leaves using response surface methodology [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2019.
- [11] 李莉, 张智, 张赛, 等. 基于响应面法优化 MAP 法处理垃圾渗滤液工艺的研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1289-1295.
LI L, ZHANG Z, ZHANG S, et al. Study on technological parameters of the treatment of landfill leachate by MAP method using response surface methodology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(6): 1289-1295.
- [12] 唐志强, 张全党, 郑瑛玮, 等. 臭氧微纳米气泡-高级氧化耦合工艺深度处理工业废水 [J]. 水处理技术, 2024, 50(5): 130-135.
TANG Z Q, ZHANG Q D, ZHENG Y W, et al. Advanced treatment of industrial wastewater using ozone micro nano bubble advanced oxidation coupling process [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(5): 130-135.