

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.24.018

流域水环境模型在茅洲河流域系统治理中的应用

张凤山¹, 魏俊¹, 唐颖栋¹, 曹梦沂²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 中国电建集团环境工程有限公司, 浙江 杭州 310015)

摘要: 茅洲河流域系统治理自 2016 年正式启动以来,按照“织网成片、正本清源、理水梳岸、寻水溯源”四步骤逐步推进,2019 年底流域水质达到近 30 年来最好状态。流域水环境模型在茅洲河系统治理过程中发挥了重要作用,在工程规划设计、工程调度以及工程优化调度等不同情景得到成功应用。简要回顾了茅洲河系统治理中主要的三次模型研究的需求背景和应用过程,对比分析了各阶段模型之间的区别和联系。茅洲河流域水环境模型研究工作为下一阶段逐步向基于全要素的源-网-河耦合模拟及工程后评估等方面发展奠定了基础。

关键词: 流域水环境模型; 茅洲河流域; 系统治理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)24-0100-07

Application of Watershed Water Environmental Model in the Systematic Management of Maozhou River Basin

ZHANG Feng-shan¹, WEI Jun¹, TANG Ying-dong¹, CAO Meng-yi²

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. PowerChina Group Environmental Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: Since the official launch of Maozhou River basin systematic management in 2016, it has been gradually advanced in accordance with the four steps of “connecting drainage network, separating rainwater and sewerage from source, investigating and evaluating of water-shore, and ecological replenishment”. By the end of 2019, the water quality of the basin reached its best level in the past 30 years. The watershed water environmental model has played an important role in the systematic management of Maozhou River, and has been successfully applied in different scenarios such as project planning and design, project scheduling, and project optimal operation. This article briefly reviewed the demand background and application process of the main three modeling studies, and analyzed the differences and connections among the models at each stage. The Maozhou River model research lays the foundation for the next stage to gradually develop to the source-network-river coupling simulation based on all elements and post evaluation of projects.

Key words: watershed water environmental model; Maozhou River basin; systematic management

近年来,我国黑臭水体治理理念和技术不断发展,以水质改善为核心,逐渐形成了“源-迁-汇”全过程治理的主要治理思路^[1],以及以物理、化学和生物方法相结合的综合治理技术体系^[2]。水环境数学模型经过长期发展,在城市水环境治理和流域水务管理中得到了广泛应用^[3-4]。

深圳是我国七大严重缺水城市之一,人口、经济发展与水资源、水环境矛盾突出^[5]。近年来,深圳市大力开展水污染治理,基于水环境模型的相关研究也层出不穷^[6-9]。茅洲河是深圳第一大河,也是长期以来深圳乃至珠三角地区污染最为严重的河流之一^[10-11]。2007年—2014年,茅洲河流域污染严重,水体黑臭,处于地表劣Ⅴ类水质,主要污染物为总氮、总磷和氨氮等^[9],生活污染和雨水径流污染占比较大^[12]。茅洲河流域位于深圳市西部中心区域,中下游河段为深圳、东莞界河,区位优势突出,人口密集,自21世纪以来虽先后经过多次治理,但成效有限^[12]。为了改善茅洲河流域水环境状况,2016年初茅洲河流域系统治理正式启动,深圳宝安区、光明新区以及东莞长安镇两市三地协作,按照“织网成片、正本清源、理水梳岸、寻水溯源”四步逐级推进治理方案。流域水体于2019年底顺利消除黑臭,达到近30年来最好水平^[13]。

流域水环境模型研究贯穿茅洲河系统治理始终,为优化工程规划设计、指导工程调度和流域管理提供了良好的技术支撑^[14]。同时,茅洲河流域模型也随着工程建设的推进逐步更新迭代,功能日趋完善。笔者将简要回顾流域水环境模型在茅洲河系统治理中的应用过程,介绍各阶段模型的需求背景、应用情况和总体评价,对比分析各阶段模型之间的区别与联系,并结合治水理念和治理技术的发展方向对下阶段茅洲河模型研究工作进行展望。

1 茅洲河流域概况及系统治理历程

1.1 流域概况

茅洲河流域位于珠三角东南部,水系呈不对称树枝状分布(见图1),干流发源于深圳境内的羊台山北麓,流经深圳市的石岩、公明、光明、松岗、沙井街道和东莞市的长安镇等地,河流上游流向为自南向北,到中下游后折向西,入伶仃洋出海。茅洲河流域面积388.23 km²(含石岩水库44 km²),其中深圳310.85 km²(占80.1%),东莞77.38 km²(占19.9%)。茅洲河干流全长41.6 km,其中塘下涌~

河口的12 km河段为深圳与东莞的界河,界河段右岸为东莞长安镇,左岸沙井河以上为深圳宝安区松岗街道,以下为宝安区沙井街道。茅洲河流域具有人口密度高、工业企业众多、本底水资源匮乏、面源污染严重等特点^[10],具有高密度建成区的典型特征。



图1 茅洲河流域水系

Fig. 1 Map of Maozhou River basin

1.2 系统治理历程

自2016年起,茅洲河流域系统治理工作按照“织网成片、正本清源、理水梳岸、寻水溯源”四步骤有序推进。其中,“织网成片”主要对茅洲河流域现状排水管网展开系统梳理,通过管道接驳、干管修复等措施打通污水收集系统;“正本清源”主要从源头出发,融入海绵城市理念,排查流域内下垫面、污染源等情况,以小区级雨污分流为核心,结合城市更新和城中村治理,有效削减散乱污排放;“理水梳岸”主要在梳理现有沿河雨水排口、排水沟渠的基础上,完善雨水收集系统和排放系统,同时实施碧道工程,逐步形成水文化的展示窗口;“寻水溯源”着眼于实现流域水质常态化稳定达标的远期目标,全面盘点茅洲河流域及周边含东江、西江水系直径约200 km范围内的水资源和水利工程情况,从流域内雨洪资源利用、跨流域调水、再生水补水、海水利用等方面开展全面论证。目前,茅洲河流域系统治理工作已接近尾声,流域水环境状况显著改善。

2 系统治理各阶段水环境模型的应用

茅洲河流域感潮作用明显,从建模角度分析主要难点有:感潮河段受径流、潮流共同作用,水文水动力条件复杂;污染情况复杂,负荷概化难度大;闸站工程众多,人工干预显著;工程建设持续进行,工程影响不断更新。为了与工程治理进度相匹配,在

工程各阶段提供必要的分析论证,系统治理至今共进行 3 次主要的模型研究工作。

2.1 茅洲河流域模型 1.0

2.1.1 需求背景

2016 年—2017 年为茅洲河系统治理第一阶段,主要进行顶层设计工作,具体开展织网成片工程,即管网接驳完善、干管修复等工程。为了支撑茅洲河治理顶层设计需要,辅助进行工程布局和规模确定,定量预测污染负荷削减、水环境容量扩增等措施对流域水质的影响,基于 CJK3D 的茅洲河模型 1.0 应运而生。

2.1.2 模型应用

茅洲河流域模型 1.0(见图 2)包括干流及主要一级、二级支流,模型下游河口交椅湾边界北至仙脚屋、南沙,南至正强码头,上游边界至东坑水附近,模拟区域采用三角形网格为计算单元。模型用于模拟茅洲河干流以及沙井河、排涝河等主要支流的水动力水质过程,其余大部分支流均作一定概化处理。模型忽略流域内控制闸的影响。

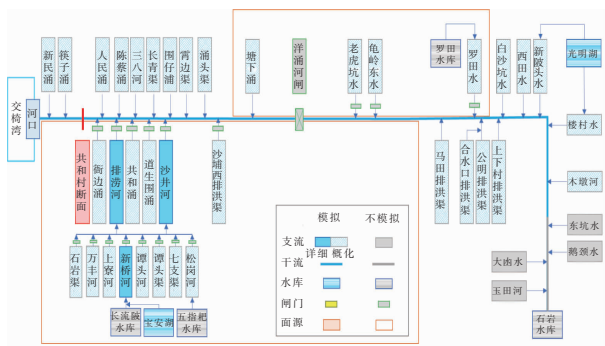


图 2 茅洲河流域模型 1.0 概化图

Fig. 2 Generalized graph of Maozhou River basin model 1.0

为初步确定补水工程规模,该阶段通过水动力水质数学模型评估在不同补水工况下的干流水质改善效果。结合近期(2017 年)、远期(2020 年)考核目标拟定合理的补水运行方式。综合工程造价、实施难易程度等因素进行方案组合分析,根据各方案水质达标情况,初步确定推荐方案(见表 1)。

表 1 各水平年推荐补水方案

Tab. 1 Recommended water replenishment scheme of each design level year

设计水平年	推荐方案
2017	沙井污水厂提标、扩建 + 松岗污水处理厂扩建
2020	沙井、松岗、公明、光明污水处理厂扩建且扩建部分出水水质准 IV 类标准 + 宝安湖 + 光明湖 + 海水补水

2.1.3 模型评价

本次建模处于茅洲河流域综合治理工程初期,主要为顶层设计服务,为茅洲河补水工程设计提供重要依据。但由于模拟阶段处于工程治理前期,模型概化处理方面还存在以下不足:

① 水质模型参数仍缺少足够的实测数据检验,并且茅洲河设计方案在治理过程中不断优化,边界概化、模型工况选择与后续工程实际有所差别,模型模拟结果缺少实际运行工况的检验。

② 茅洲河流域闸站众多,其中,洋涌河闸是茅洲河干流最重要的水利枢纽,对茅洲河水动力、水质影响重大,支流河口闸也会影响干支流的水动力、水质情况,本阶段模型未考虑洋涌河闸以及支流河口闸的影响。

③ 模型为二维模型,模拟精细程度虽优于一维模型,可反映断面内水质分布特点,但由于缺少足够实测数据支撑,二维模型的精度优势难以发挥;再则,二维模型模拟时间成本相对较高,虽然在顶层设计阶段并不突出,但一定程度上影响了模型快速调参、快速预测,对快速决策产生一定限制。

2.2 茅洲河流域模型 2.0

2.2.1 需求背景

2017 年底,茅洲河“织网成片”基本完成,“正本清源”初步启动。此时茅洲河工程建设迎来高峰,流域水质较 2015 年已明显改善,但由于河口潮动力条件不佳,不利于污染团迁移扩散,干流水质消除黑臭难度仍然较大。在充分考虑潮汐作用和闸泵调度的前提下,为较准确地分析各类工程对于干流断面水质的影响,快速制定现有工程联合调度预案,保证干流水质达标,需要较为可靠且高效的模型指导决策调度,为此建立了茅洲河模型 2.0(见图 3)。

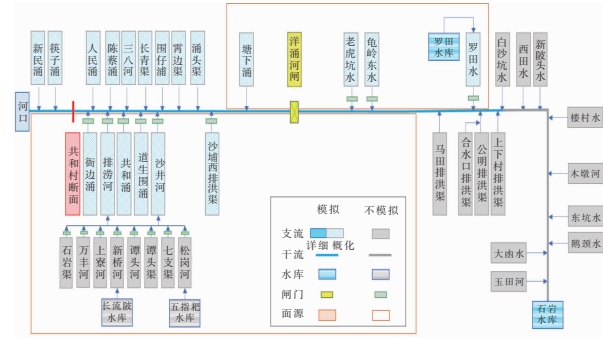


图 3 茅洲河流域模型 2.0 概化图

Fig. 3 Generalized graph of Maozhou River basin model 2.0

2.2.2 模型应用

茅洲河模型 2.0 通过 MIKE 11 HD/AD 建立一维模型,模型上边界为茅洲河白沙坑断面(宝安区入境断面),下边界为茅洲河河口,模型范围为干流 18 km,各支流概化为点源输入。

在茅洲河模型 1.0 的基础上,经过一年多综合整治工程的深入设计和工程建设,茅洲河数据积累和经验总结更加丰富。考虑到闸门开启方式对上下游水质有显著影响^[15],模型充分利用本流域水闸、泵站等工程措施进行调度,分析工程调度下的河道水流特性及污染情况。重点分析在感潮作用下,通过洋涌河闸及上游水库生态补水的联合调度实现干流水质改善。

洋涌河闸位于茅洲河光明新区与宝安区交界下游约 4 km 处,由 5 孔闸门及两侧溢流堰组成,是茅洲河干流重要的控制工程,对干流水动力和水质情况影响重大。为了合理概化洋涌河闸的影响,模型采用水闸-堰坝组合建筑物的方式,实现了各闸孔独立调度模拟。在此基础上,模型以洋涌河闸为核心控制工程,综合考虑闸门开启时间、水库补水量、补水水质、截污率、应急处理设施运行情况等因素,对 2017 年末各类工程组合调度情况进行对比分析,提出较优的工程调度预案并指导实践。采用 2017 年 11 月 24 日 19:00—25 日 20:00 26 h 全潮期共和村断面水位、水质同步监测数据进行模型参数率定,结果如图 4 所示,可见模拟结果与实测值较为吻合,水位和水质的纳什系数(NSE)分别达到 0.95 和 0.79,模型参数可靠性较高。

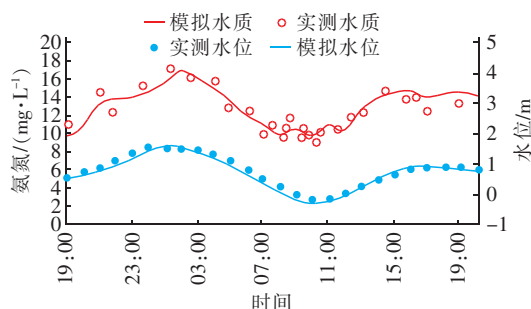


图4 模型 2.0 参数率定结果

Fig. 4 Parameter calibration results of model 2.0

图 5 为洋涌河闸推荐调度规则下,2017 年末共和村断面氨氮浓度模拟结果。结果表明,共和村断面由于临近河口,水质随河口潮位呈周期性变化,受河口污染团影响,涨潮期断面水质有恶化趋势,落潮

期水质相对改善。配合潮汐规律进行洋涌河闸规则性调度,在落潮期集中开闸下泄可使共和村断面水质在落潮期明显改善,证明了优化调度方案的有效性。

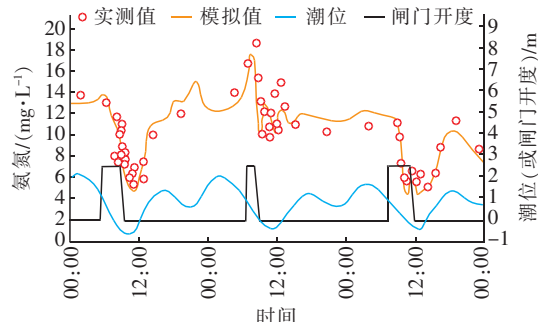


图5 洋涌河闸调度情况下 2017 年末共和村断面氨氮浓度

Fig. 5 $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration of Gonghecun section at the end of 2017 under the control of Yangchonghe sluice

2.2.3 模型评价

模型 2.0 相较于 1.0 版本,做了 3 点调整:

① 为了提高模型的运行效率和预测效率,迅速制定调度规则,预测水质分布规律,在保证模型精度足够的同时,模型计算的时效性也是重要因素之一。同时,由于水质达标采用断面考核的方式,断面内的水质分布规律并非主要研究内容。基于以上考虑,选择建立一维模型进行模拟。

② 在模型中实现了对洋涌河大闸的精细模拟,作为茅洲河干流最重要的水利枢纽,模型对其闸孔、溢流堰等结构进行了模拟,并制定了灵活的调度工况,为指导实际闸门调度建立了可靠的模型基础。

③ 模型边界根据工程实时进度进行调整,基于实测数据对水动力和水质参数进行动态率定和验证,保证模型对各种调水工况下的河道水动力水质情况具有较好的适应性。

该模型在短时间内提供了快速有效的系列调度方案,较好地模拟了不同边界情况下河道水质规律,模拟成果得到检验。但模型仍然存在着一定不足:首先,支流概化为点源,无法对支流内的水质情况进行模拟;其次,模型污染边界通过实测数据结合工程经验概化得到,缺少一定的理论支撑;第三,模型无法对面源污染进行模拟。

2.3 茅洲河流域模型 3.0

2.3.1 需求背景

2019 年,在“织网成片、正本清源”基本完成后,“理水梳岸、寻水溯源”阶段稳步推进,全面消黑工

作有序推进,茅洲河流域黑臭水体已大部分消除,目标在 2019 年茅洲河干支流达到 V 类水标准,2020 年稳定达到 V 类水标准。随着流域内污水收集系统的逐步完善,降雨径流污染将成为茅洲河流域水环境治理的重点,在启动具体治理工程前,有必要对茅洲河雨水污染规律进行一系列基础研究。为此,在已有模型基础上进一步改进,建立茅洲河模型 3.0 (见图 6),基于模型重点进行降雨径流污染的模拟,对干、支流水质情况开展全面研究。

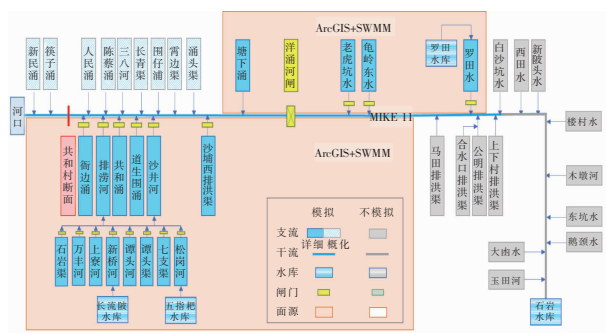


图 6 茅洲河流域模型 3.0 概化图

Fig. 6 Generalized graph of Maozhou River basin model 3.0

2.3.2 模型应用

茅洲河模型 3.0 通过 ArcGIS + SWMM + MIKE 11 HD/AD 建模,模型上边界为茅洲河白沙坑断面(宝安区入境断面),下边界为茅洲河河口,模型范围包括茅洲河干流以及宝安区一、二级支流,共计 19 条河道。

模型基于 ArcGIS 进行空间数据分析和处理,应用 SWMM + MIKE 11 建立流域水环境模型。共选取前期干燥天数在 7 天以上的大、中、小雨 3 场典型降雨过程,24 h 降雨量分别为 43.4、17.6、8.8 mm。由 SWMM 计算典型降雨情景下,面源污染负荷及雨水排口流量和浓度过程,MIKE 11 实现河网水动力水质过程及建筑物调控模拟,模型之间通过雨水排口实现数据交互。模型采用 2019 年 3 月 21 日 09:00—22 日 10:00 26 h 全潮期共和村断面水位、水质同步监测数据进行参数率定,结果见图 7,可见模拟结果与实测值较为吻合,水位和水质的纳什系数分别达到 0.99 和 0.73,模型参数可靠性较高。

模型以典型降雨场次下茅洲河干支流水质过程及工程调控响应为主要模拟对象。模拟结果表明,雨后干支流各河道水质变化呈现不同规律,支流水质波动一般大于干流;潭头河、沙井河、潭头渠等支

流河道沿线面源污染负荷较高,雨后水质显著恶化,但由于现状生态补水较为充沛,水质恢复较快;石岩渠、松岗河中上游等河段由于生态补水不足,水体自净能力较弱,污染风险相对较高,雨后水质恢复缓慢,影响流域水质整体稳定性,需对现状补水方案进行优化。由于现状河道补水水源主要为再生水且总量有限,故在补水总量不变的前提下,调整雨后部分河道(段)补水量。以中雨为例,对部分河道补水方案进行优化(见表 2),高污染风险河道雨后水质恢复至地表 V 类标准的速度明显加快。

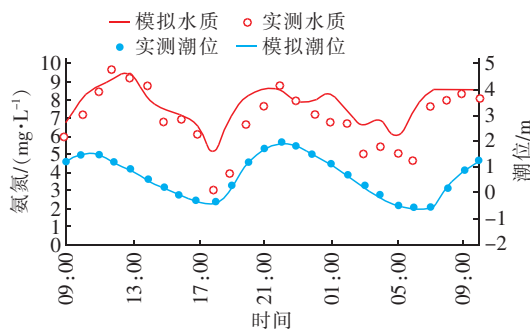


图 7 模型 3.0 参数率定结果

Fig. 7 Parameter calibration results of model 3.0

表 2 补水方案优化策略

Tab. 2 Optimal strategy of water replenishment

河道	补水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)		雨后达标 时间/d		备注
	现状	优化后	现状	优化后	
七支渠	2	2	2.5	0.5	补水点移至上游
万丰河	2.4	2.4	2.7	0.8	补水点移至上游
沙井河	6.5	6	0.9	1	调整补水量
上寮河	10.6	9.1	0.8	1	调整补水量
松岗河	0	1	2.4	0.8	增设补水点
石岩渠	0	1	3	1	增设补水点

2.3.3 模型评价

茅洲河模型 3.0 阶段相关成果可为基于雨后水质改善目标的茅洲河流域工程调度提供借鉴。该阶段模型除了对现有工程进度导致的边界条件变化做出更新以外,为了对降雨径流污染影响下干、支流水质过程进行模拟,在模型 2.0 基础上做以下改进:

① 模型范围增加了宝安片区 18 条支流,可对干支流水质状况进行模拟。

② 模型对支流河口闸门以及节制闸进行模拟,闸门调度工况更加丰富。

③ 模型对茅洲河流域宝安片区降雨特征及地块面源污染特征进行空间分析和统计分析,污染负荷边界计算更为合理。

④ 模型考虑了宝安片区 428 个沿河雨水排口,可实现对降雨径流污染的模拟。

2.4 茅洲河三次流域模型对比分析

模型研究工作在茅洲河系统治理中贯穿始终,

是辅助工程设计、建设与后期运维管理的有效工具,2016 年至今的历次模型工作处在茅洲河治理工程的不同阶段,分别在工程规划设计、工程调度以及工程调度优化等不同场景得到应用。

各阶段模型从各自研究需要出发,研究内容各有侧重,模型范围、概化方式和研究方法也有所不同,具体见表 3。

表 3 茅洲河流域模型总结

Tab.3 Summary of Maozhou River models

项 目		模型 1.0	模型 2.0	模型 3.0
背景		茅洲河顶层设计	茅洲河阶段性考核	茅洲河全面消除黑臭
建模时间		2016 年 6 月	2017 年 11 月	2019 年 8 月
建模软件		CJK3D	MIKE 11 HD/AD	ArcGIS + SWMM + MIKE 12 HD/AD
水质 目标	2017 年	氨氮,消除黑臭	共和村断面消除黑臭	
	2019 年			干支流达到 V 类水标准
	2020 年	氨氮准Ⅳ类		干支流稳定达到 V 类水标准
模型作用		模拟不同工况条件下茅洲河流域水质变化及分布情况	结合工程实施进度与实测数据建立模型,提出干流达标调度策略	分析降雨径流污染,优化中水补水及闸门调度原则,提出雨后流域达标调度策略
模型范围		茅洲河干流、一级支流	茅洲河干流	茅洲河干流,宝安区一、二级支流
维度		二维	一维	一维
模拟时段		2015 年、2017 年、2020 年全年	2017 年 11 月—12 月	2019 年 10 月—12 月;2020 年降雨过程
闸门 调度	洋涌河闸		考虑	考虑
	支流河口闸			考虑
降雨污染				考虑

3 结论与展望

模型研究紧密融入茅洲河流域系统治理的各个阶段。模型 1.0 在茅洲河顶层设计阶段建立和运用,为辅助工程布局和规模论证提供了良好的支撑,对不同污染负荷削减量和水环境容量扩增情况下近远期规划年的水质状况进行了定量预测;模型 2.0 以干流水质改善目标下的工程联合调度为主要研究内容,结合现场试验和实测数据,为快速制定闸站工程优化调度方案作出了贡献;模型 3.0 以降雨径流特征分析和雨后水质恢复规律为研究重点,相关成果可为雨后茅洲河流域工程调度提供参考。

随着茅洲河流域治理系统工程逐步落地,系统治理全面进入收尾阶段,茅洲河治理的重心逐渐由水质改善向水质长效巩固转变,此时,模型技术不仅是分析水动力水质基本规律、优化调度方案的技术手段,同时也扮演着论证工程目标的长期可达性、潜在项目必要性的重要角色。在后续研究中,随着精

准治污技术体系的不断发展,围绕“源-网-河”耦合模拟、工程后评估等方面仍需要开展大量的研究工作。

参考文献:

[1] 魏俊,陆瑛,程开宇,等. 城市水环境治理理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.
WEI Jun, LU Ying, CHENG Kaiyu, et al. Principles and Approaches of Urban Water Environment Management [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018 (in Chinese).

[2] 宁梓洁,王鑫. 黑臭水体治理技术研究进展[J]. 环境工程,2018(8):26-29,73.
NING Zijie, WANG Xin. Overview of the black-odorous waters treatment technologies [J]. Environmental Engineering, 2018(8):26-29,73 (in Chinese).

[3] 朱瑶,梁志伟,李伟,等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报,2013,24(10):

- 3012-3018.
- ZHU Yao, LIANG Zhiwei, LI Wei, *et al.* Watershed water environment pollution models and their applications: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 3012-3018 (in Chinese).
- [4] 穆聪, 李家科, 邓朝显, 等. MIKE 模型在城市及流域水文——环境模拟中的应用进展 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 74-83.
- MU Cong, LI Jiake, DENG Zhaoxian, *et al.* Application of MIKE model in urban and basin hydrological-environmental simulation [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(2): 74-83 (in Chinese).
- [5] 文奇. 深圳市水环境问题及治理对策研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- WEN Qi. Research on Water Environment Problem and Control Countermeasure of Shenzhen City [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [6] 宋芳, 秦华鹏, 陈斯典, 等. 深圳河湾流域水污染源解析研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 317-328.
- SONG Fang, QIN Huapeng, CHEN Sidian, *et al.* Water source apportionment of pollutions in Shenzhen Bay basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 317-328 (in Chinese).
- [7] 朱闻博. 水质模型在深圳前海水城中的应用 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(3): 104-108.
- ZHU Wenbo. Application of water quality model in Qianhai water city in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(3): 104-108 (in Chinese).
- [8] 吴燕霞. 雨源型城市河流水质变化规律及其模拟研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- WU Yanxia. Study on Change Rule and Simulation of Water Quality in Urban Rivers with Rainfall Sources [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019 (in Chinese).
- [9] 赵迪. 茅洲河水质评价与水体污染防治综合措施研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- ZHAO Di. Research of the Maozhou River Water Quality Assessment and Comprehensive Pollution Control Measures [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017 (in Chinese).
- [10] 楼少华, 吕权伟, 任珂君, 等. 从深圳治水历程研究高密度建成区排水系统的选择与改造 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(18): 28-31.
- LOU Shaohua, LÜ Quanwei, REN Kejun, *et al.* Study on the selection and reconstruction of urban drainage system in high density construction area from the course of water control in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(18): 28-31 (in Chinese).
- [11] 林高松, 黄晓英. 深圳市主要河流环境质量现状评价与污染特征分析 [J]. 黑龙江环境通报, 2015, 39(4): 74-78.
- LIN Gaosong, HUANG Xiaoying. Water quality assessment and pollution characteristics analysis of main rivers in Shenzhen City [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2015, 39(4): 74-78 (in Chinese).
- [12] 陈世勇. 基于控制单元划分的茅洲河流域水环境现状分析与水质预测研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- CHEN Shiyong. Study on Present Situation Analysis and Prediction of Water Quality Based on Control Unit in the Maozhou River Basin [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016 (in Chinese).
- [13] 张子俊. 茅洲河水质创近 30 年来最好水平 [N]. 南方日报, 2020-01-08 (A03).
- ZHANG Zijun. Water quality of Maozhou River reaches its best level in nearly 30 years [N]. Nanfang Daily, 2020-01-08 (A03) (in Chinese).
- [14] 郭聪, 施家月, 张亚力, 等. 一、二维耦合模型在茅洲河水环境治理中的应用 [J]. 环境影响评价, 2019, 41(4): 59-62 (in Chinese).
- GUO Cong, SHI Jiayue, ZHANG Yali, *et al.* Application of 1D-2D coupling model in the water environment management for Maozhou River [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(4): 59-62 (in Chinese).
- [15] 窦明, 米庆彬, 李桂秋, 等. 闸控河段水质转化机制研究 I: 模型研制 [J]. 水利学报, 2016(4): 527-536.
- DOU Ming, MI Qingbin, LI Guiqiu, *et al.* Research on water quality transformation mechanism in sluice-controlled river reaches I. Development of the mathematical model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016(4): 527-536 (in Chinese).

作者简介: 张凤山(1992-), 男, 内蒙古丰镇人, 工学硕士, 工程师, 主要从事流域规划及水环境数值模拟设计与研究工作。

E-mail: zhang_fs@ecidi.com

收稿日期: 2020-07-31

修回日期: 2020-08-25

(编辑: 衣春敏)