

MIKE 模型在城市及流域水文—环境模拟中的应用进展

穆聪¹, 李家科¹, 邓朝显², 李亚娇³, 张蓓¹, 邓陈宁¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设(集团)有限公司海绵城市技术中心, 陕西 西安 712000;

3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: MIKE 模型可对城市及流域水环境、水资源、水安全及水生态等方面进行模拟, 软件因功能强大、界面友好而在国内外现实工程中获得了广泛应用。文中归纳了 MIKE11、MIKE21、MIKE FLOOD、MIKE URBAN、MIKE BASIN 和 MIKE SHE 模型的基本原理、特点及应用范围。对比了主要模型的功能, 总结了各模型及其不同组合方式在实际工程中的应用情况, 提出了 MIKE 模型存在的局限性并对该模型未来发展方向进行展望, 以期 MIKE 模型更好地应用于实际问题提供参考。

关键词: MIKE 模型; 流域; 水环境; 水生态; 环境模拟; 城市

中图分类号: P333; TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0071-10

Application of MIKE model in urban and basin hydrological-environmental simulation

MU Cong¹, LI Jiako¹, DENG Zhaoxian², LI Yajiao³, ZHANG Bei¹, DENG Chenning¹

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of

Technology, Xi'an 710048, China; 2. The Technology Research Center for Sponge City,

Fengxi New City Development and Construction Group Company, Xi'an 712000, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Mike model can be used to simulate urban and basin water environment, water resources, water security and water ecology. The software has been widely used in practical engineering domestic and abroad as a result of powerful functions and user-friendly interface. The basic principles, characteristics and application scope of MIKE11, MIKE21, MIKE FLOOD, MIKE URBAN, MIKE BASIN and MIKE SHE models are summarized. The functions of the main models are compared, and the application of each model and its different combinations in practical engineering is summarized. Finally, the limitations of the MIKE model are proposed and the future development direction of the model is prospected, in order to provide a reference for the MIKE model to be better applied to practical problems.

Key words: MIKE model; basin; water environment; water ecology; environment simulation; urban

1 研究背景

城市化进程的加快使不透水下垫面比重不断增加^[1], 洪涝灾害及面源污染情况加剧, 水环境治理及水资源调控面临巨大挑战。流域和城市作为整体

水文循环单位, 同时也为人类提供主要活动场所, 对其进行水环境和水生态保护具有重要意义。水文—环境模拟作为重要手段, 可为海绵城市规划建设、流域规划管理提供决策依据和有力支撑^[2-3]。

丹麦水资源及水环境研究所(Danish Hydraulic

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-11-09

基金项目: 陕西省自然科学基金重点项目(2015JZ013); 国家自然科学基金项目(51279158)

作者简介: 穆聪(1996-), 女, 陕西兴平人, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术。

通讯作者: 李家科(1975-), 男, 湖北荆门人, 博士后, 教授, 博士生导师, 研究方向为非点源污染与水资源保护。

Institute, 简称 DHI) 致力于健康与水环境领域的多项研究, 并具有前沿的技术和相关软件。MIKE 软件是 DHI 多位专家所共同研发应用于与水相关的工程实际问题模拟软件。该系列软件包括 MIKE 11、MIKE 21、MIKE FLOOD、MIKE URBAN、MIKE BASIN、MIKE SHE 等, 在城市内涝和流域水环境污染模拟等多个领域都广泛应用。MIKE 11 是一维水模拟软件, 其在水质、水流和泥沙的输运等问题中都有较多应用^[4], 能够为水利工程的设计研究与管理等工作提供帮助。MIKE 21 模型是二维水模拟软件, 常被用于模拟河流、河口及海洋的泥沙、水流及环境场, 为工程应用及规划提供所需的设计条件和参数^[5]。MIKE URBAN 是城市地表产汇流和管网模拟软件, 有全面的供排水管网模型, 可以用来计算有压和无压管道水流情况。MIKE FLOOD 包括完整的一维及二维洪水模拟引擎, 基于 FLOOD 平台可以将 MIKE 11 或 MIKE URBAN 与 MIKE 21 三种模型进行耦合, 实现模拟城区排水在管网中和在地表可能出现的积水处水流情况^[6], 及对洪水, 海洋风暴和堤坝决口等问题的模拟。MIKE BASIN 适用于流域或区域尺度, 基于 GIS 进行水资源规划和管理的工具软件, 用以解决地表水产汇流及水质模拟等问题。MIKE SHE 能够模拟水文循环的许多过程, 常应用于流域管理、洪泛区研究、环境评估、地表水和地下水的相互影响等^[7]。本文对 MIKE 系列模型的原理及应用情况进行了较为全面的介绍, 并提出了其存在的问题以及未来发展方向。

2 MIKE 系列模型基本介绍及原理

DHI 公司成立于 1964 年, 在过去的几十年里研发出了 MIKE 系列模型, 如 MIKE 11、MIKE 21、MIKE URBAN、MIKE FLOOD、MIKE BASIN、MIKE SHE 等。

MIKE 系列软件在业界具有较高的应用率和认可度, 该软件可应用于众多水环境和生态系统模拟, 维度从一维到三维, 如城市和流域降雨产流过程、河流河口模拟等。同时兼具功能强大、界面友好、模拟计算快速准确等特点^[8], 本文就一、二维水环境、城市管网、洪水模拟、流域水资源规划管理以及地下水模拟软件在城市雨洪和流域水环境中的应用进行分析研究。

2.1 MIKE 11 模型

MIKE 11 是一维水动力学模型, 是具有水流、水质和泥沙等多功能水环境数值模拟的模型软件^[9],

以圣维南(Saint - Venant)方程组为理论基础, 可以与 DHI 开发的其他软件进行交互运用^[8]。

MIKE 11 的主要模块有水动力(HD)模块、降雨径流(RR)模块、非黏性泥沙输运(ST)模块、对流扩散(AD)模块、水质(ECO Lab)模块等^[10]。MIKE 11 不同模块的研究范围、功能和基本原理见表 1。HD 模块为其他模块提供计算基础, 即 HD 模块是 MIKE 11 软件中最重要的模块^[11]。

HD 模块基于一维 Saint - Venant 方程, 并利用六点中心隐式差分格式(Abbott)进行求解, 模拟得到各河道断面、各个时刻的水位和流量等水文要素信息^[12]。这样通过方程组的求解有利于保证模型稳定性和计算精度。MIKE 11 可以与 GIS 文件数据交互, 并能够与 MIKE SHE、MIKE21、MIKE URBAN 进行耦合计算。

2.2 MIKE 21 模型

目前以垂线平均水流作为二维水流模型的研究对象, 模拟计算平面流场的变化情况^[5]。在众多二维数学模型中 MIKE 21 是应用较为普遍的模型之一, 该模型可用于多种水环境模拟, 为工程应用及海岸规划提供确切有效的参考^[13]。

多年来, MIKE 21 在世界范围内不断发展, 其在二维数值模拟方面具有强大功能^[14], 可广泛应用于河流、湖泊、河口和海岸水流及泥沙的仿真模拟。二维表面水流模型 MIKE 21 基于矩形网格, 不考虑水的垂向分层^[15]。HD 模块是 MIKE 21 的核心模块, 为环境模拟和泥沙传输提供了水动力学基础^[5], 各模块的应用情况见表 2。

2.3 MIKE URBAN 一维管网模型

基于 MOUSE 模型界面, MIKE URBAN 与 GIS 用户界面做到了完全的整合^[16]。MIKE URBAN 模型假设水流沿管道横断面没有变化(即隐式有限差分法)来求解一维水流问题^[17]。MIKE URBAN 模型大致分为 3 个模拟过程阶段, 分别为地表产流过程、汇流过程和地表的漫流过程^[18]。连续方程和动量方程是该模块理论基础, 采用有限差分法进行求解, 其模拟结果可以与一维河道及二维地面漫流进行耦合, 使其能够准确模拟城市内暴雨的洪水流速及淹没情况^[19]。

排水系统模型是进行城市雨洪管理分析的重要组成部分, 不同的排水系统模型有着不同的特点^[20-21]。MIKE URBAN 模型是其中一种, 其不同于其他许多模型仅在某一方面表现突出, 它在模拟城市管网的同时还能实现二维地面洪水的演算^[22]。

2.4 MIKE FLOOD 一、二维耦合模型

MIKE FLOOD 模型不能进行一、二维的单独模拟,须调用 MIKE 11 或 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模块,利用 MIKE FLOOD 建立的耦合模型进行耦合计算,该耦合模型不仅可以发挥出两个模块的优势,还能够有效规避单独模拟时遇到的精度和步长等方面的问题^[23]。

MIKE FLOOD 与其他模块进行连接的方式有 4

种,分别为河道排水管网连接、标准连接、管网与地形耦合连接和侧向连接^[24]。标准连接是将 MIKE 11 中的一端与 MIKE 21 中的一个或多个计算网格单元进行链接;侧向连接,即河道与二维模型计算区域通过两岸进行水流交换;河道排水管网连接是用来模拟河网和城市排水系统的相互作用^[24];地形分布与管网布置耦合连接的关键是地表径流与地下排水系统进行交换的问题。

表 1 MIKE11 模型各模块原理及功能

| 模块名称 | 研究范围 | 功能 | 基本原理 |
|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| HD 水动力模块 | 研究某一流域内河道的非连续性水流运动规律的模型 | 结果可以对河道水流运动的基本特征进行描述 | 对圣维南方程组即一维非恒定流方程组的求解 |
| RR 降雨径流模块 | 研究模拟流域内的降雨—径流过程 | 计算结果作为旁侧入流进入到 HD 模块的河网中 | 包括 NAM 法、UHM 法、SMAP 方法等 |
| ST 非黏性泥沙运输模块 | 泥沙运输及河床演变研究 | 将床阻力和断面改变反馈给水动力模拟 | 计算分级泥沙运输分布和颗粒尺寸分布 |
| Load 污染负荷计算模块 | 应用于农业、禽畜、工业及生活等多种污染源 | 点源/非点源污染物负荷估算 | 可根据时间进行污染负荷分配以及根据距离进行污染物衰减 |
| AD 对流扩散模块 | 水体中的可溶性物质和悬浮物质对流扩散过程模拟 | 能精确计算较大浓度梯度、模拟黏性泥沙的侵蚀和沉积 | 求解溶解物或悬浮物的对流扩散方程 |
| ECO Lab 水质模块 | 用于河流、湿地、湖泊、水库等的水质模拟 | 可与 MIKE11 的 HD、AD 模块集成计算 | 按实际需求自定义多种污染物,并定义相应的降解速率进行模拟 |
| FF 洪水预报模块 | 河流洪水预报 | 预测河流系统内各处的水位和流量 | 根据设定的未来气象资料河流模型边界处的未来变化模拟 |

表 2 MIKE21 模型各模块的应用

| 模块 | 雨洪 | 海洋和海水水力结构 | 海水淡化 | 港口码头和导航渠道 | 河口海岸管理 | 沉积物和形态 | 水质生态 | 环境影响评估 | 水文预报 | 单个网格 | 多网格 | 灵活网格 |
|--------------------|----|-----------|------|-----------|--------|--------|------|--------|------|------|-----|------|
| MIKE 21 水动力模块 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| MIKE 21 对流扩散 | | | √ | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| MIKE 21 非黏性泥沙模块 | | | | √ | √ | √ | | | | √ | | √ |
| MIKE 21 黏性泥沙模块 | | | | √ | √ | √ | √ | √ | | √ | √ | √ |
| MIKE 21 粒子追踪 | | | | | | √ | | √ | √ | √ | √ | √ |
| MIKE 21 波谱模块 | | √ | | √ | √ | √ | | √ | √ | √ | | √ |
| MIKE 21 抛物线性缓坡方程模块 | | √ | | √ | √ | √ | | | | √ | | |
| MIKE 21 椭圆形缓坡方程模块 | | √ | | √ | √ | | | | | √ | | |
| MIKE 21 波浪模块 | | √ | | √ | √ | | | | | √ | | |

一维水动力模型与二维漫流模型在城市雨洪模拟中具有各自的优势和特点,而 MIKE FLOOD 对这两种模型的优势进行了联合。其三者功能对比如表 3 所示^[19]。

表 3 主要模型功能对比表

| 功能 | MIKE11 | MIKE21 | MIKE FLOOD |
|----------------------|--------|--------|------------|
| 河流水动力 | √ | √ | √ |
| 潮汐影响 | √ | √ | √ |
| 洪水淹没范围 | √ | √ | √ |
| 洪水历时 | √ | √ | √ |
| 淹没水深 | √ | √ | √ |
| 水流交换 | √ | √ | √ |
| 详细的流速场 | × | √ | √ |
| 未知的流向 | × | √ | √ |
| Split flow scenarios | × | √ | √ |
| 洪水预报 | √ | × | √ |
| 简单水工构筑物 | √ | √ | √ |
| 高级水工构筑物 | √ | × | √ |
| GIS 洪水淹没图 | √ | √ | √ |
| 2D 洪水风险图 | × | √ | √ |

2.5 MIKE BASIN 模型

MIKE BASIN 是基于 GIS 以 Arc View 为平台研发的应用于流域或区域尺度的水资源综合规划和管理工具^[25],该模型由 NAM(降雨径流)和 MIKE BASIN(水资源配置)两个子模型组成,其中 NAM 是用于降雨径流计算的集总式水文前置模型^[26-27],

MIKE BASIN 是解决水资源的优化配置及水质模拟等问题的模型^[26]。

MIKE BASIN 主要根据水量平衡及不同调度方式进行水资源平衡分析,有大量的时间序列数据分析和数据显示功能,可用于数据信息的分析和共享,可以通过简单编程来实现其他运算,在时间步长和单位设置方面具有较高灵活性,能够解决多目标优化问题,并加深对流域水资源问题的认识和理解,帮助管理规划人员进行不同预案的分析,寻求合适的水供需平衡的方案。

2.6 MIKE SHE 模型

MIKE SHE 是由欧洲水文模型(SHE)发展而来的能够模拟陆表和地下水文循环过程^[28],是应用较多的分布式水文模型之一。该模型模拟了水循环中大部分的水文过程以及水量、水质和泥沙运输^[3],并且根据研究目的和数据的可得性确定各模块的空间离散程度或复杂程度^[29]。

MIKE 11、MIKE 21、MIKE URBAN、MIKE FLOOD、MIKE BASIN 和 MIKE SHE 模型原理、研究领域和功能进行总结,见下表 4。

3 MIKE 模型应用进展

3.1 MIKE11 的应用进展

MIKE 11 在一维水环境模拟中有着重要应用^[30],目前该模型在国内外被广泛用于各流域管理,包括防洪、水资源保护、大坝安全评估、湿地功能量化以及控制结构的优化^[31],这些为今后的应用与发展积累了经验,其应用情况见表 5。

表 4 MIKE 系列模型对比

| 模型名称 | 原理 | 研究领域 | 功能 |
|------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|
| MIKE 11 | Abbott 六点隐式差分格式求解一维非恒定流圣维南方程组 | 一维水模拟 | 动态模拟河流和水道水力 |
| MIKE 21 | 二维圣维南方程组的离散求解 | 二维模拟 | 模拟河流、河口及海洋的泥沙、水流及环境场 |
| MIKE FLOOD | 耦合 MIKE11 或者 MIKE Urban 和 MIKE21 | 洪水模拟 | 包括完整的一维及二维的洪水模拟引擎,能够模拟几乎所有实际洪水问题 |
| MIKE URBAN | 采用与 HD 相同的有限差分法求解 | 城市管网模拟 | 功能齐全的供排水管网模型软件,可计算有压和无压管道的水流过程 |
| MIKE BASIN | 采用数学模型技术解决流域的地表水产生、地下水资源计算与评价 | 流域水资源模拟 | 综合河网模拟系统,用于流域水资源分配和水环境研究 |
| MIKE SHE | 采用有限元的方法解决地表水、地下水运动的数学模拟问题 | 地表水和地下水综合模拟 | 分布式水文系统模拟软件,可模拟陆相水循环中所有主要水文过程 |

表 5 MIKE11 模型在实际工程中的应用模拟

| 模型 | 模拟区域 | 模拟内容 | 模拟结果 | 参考文献 |
|--------------------------------------|------------|--|---|------|
| MIKE 11 | 里多河 | 构建了里多河系统的水动力模型 | 表明该模型能够准确地模拟出河流的时变流体动力学 | [31] |
| MIKE 11 水动力、水质模块 | 浙江省流域 | 主要模拟了河流上游到水源进水口的时间 | 可以在发生污染紧急情况时进行水质预警保护饮用水安全 | [32] |
| MIKE 11 | 安徽省颍上县新城水系 | 在分析外围水系条件的基础上制定了颍上县水资源引清调度方案,并利用 MIKE11 作为计算平台 | 构建了颍上县河网水动力水质模型 | [33] |
| 基于 MIKE 11 的水动力和水质模块 | 辽河上游水域 | 模拟污染物在水体中迁移扩散和衰减的过程 | MIKE11 软件用于模拟污染物在水体中迁移扩散和衰减的过程是可行的,有节约人力物力、计算准确、便于操作和结果可视化等优点 | [8] |
| 基于 MIKE 11 的水动力模型 | 松花江流域 | 应用模型计算纳污能力的特点及计算条件,提出纳污能力计算方法 | 对管网概化造成的偏差进行改善,并考虑流域污染对纳污能力的作用 | [11] |
| MIKE 11 的水动力模块和溃坝模块 | 唐家山堰塞坝溃决过程 | 使用 MIKE 11 模拟了其溃决洪水流量过程、溃口展宽、侵蚀流速及溃口底高程的冲刷过程 | 通过参数敏感性分析发现,溃口初始宽度和筑坝材料孔隙比对结果影响较大,坝体上、下游坡比对结果影响较小 | [34] |
| 采用 MIKE11 模型中的 NAM、HD 和 SO 等 3 个主要模块 | 长江流域 | 模拟三峡和葛洲坝建造对流域水流情势变化的影响 | 建立水动力模型,进行数据分析,为生态环境评价及调度做出重要科学依据 | [30] |

综合 MIKE 11 在实际工程中的应用情况可见: MIKE 11 具有多个模块,在多个领域得到了应用,进行一维模拟所需的时间短,且模拟精度很高;具有丰富多样的结果展示方法,易于理解。但 MIKE 11 模型不能进行二维水流模拟;且难以进行不确定流的模拟;同样海洋水环境模拟也较为困难;因为条件限制,对于水流参数要做很多的概化性工作^[35]。

3.2 MIKE21 的应用进展

MIKE 21 将使用界面与计算引擎相结合,近 30 年在全球范围内已是很多专业工程技术人员不可或缺的使用工具,在国内外工程中得到众多实际应用^[5],见表 6。

综合 MIKE 21 的实际应用可见:MIKE 21 模型在网格划分上有着高于 MIKE11 的计算精度;MIKE 21 具有较为稳定的算法,从而很好的进行水流的演进、退水的全过程模拟;能够实现对于漫堤的模拟^[42-43]。不足之处有:对数据有较高的要求,需要进行数据前处理,且所需时间较长;对于支流和河道,若进行较小尺度区域的模拟,则需要具有详细具体的网格^[35]。

3.3 MIKE URBAN 的应用进展

近些年来城市内涝频发,制定有效的规划方案已经势在必行,在发达国家运用 MIKE URBAN 进行城市排水管网模拟评估已经较为普遍^[44],同样也适用于模拟数据资料相对不足的发展中国家^[45-46],目前国内也获得了越来越多的运用,见表 7。

MIKE URBAN 技术综合程度较高,模型的建立与运行具有准确、简单等特点,一方面能够对城市管网水流情况进行模拟,另一方面可进行二维洪水的演示^[22]。但在水质模拟中不如进行水流模拟时细致,在水源的选取上存在限制,因而其局限性强且存在无缝集成方面的不足,不易得到单一水流间的运行过程^[16]。

3.4 MIKE FLOOD 的应用进展

MIKE FLOOD 不能够单独进行模拟,在进行模拟时需要与其他软件组合来实现模拟效果,且在进行二维耦合模拟时所需时间过长,其结果可以将所耦合的一维、二维模型的计算结果分别进行保存。MIKE FLOOD 与 MIKE 11、MIKE 21 和 MIKE URBAN 等的耦合运用实例见表 8。

3.5 MIKE BASIN 的应用进展

目前,国内已运用 MIKE BASIN 软件成功解决

了多个项目的水资源配置问题,其在实际工程中的应用见表9。

表6 MIKE21 模型在实际工程中的应用模拟

| 模型 | 模拟区域 | 模拟内容 | 模拟结果 | 参考文献 |
|-----------------|---------------|---------------------------------------|--|------|
| MIKE 21 的水动力模块 | Koiliaris 河下游 | 模拟河流的水深、流速和泥沙运移 | 其模拟结果可以用于诸如干旱或洪涝搬运大泥沙等极端水文事件的研究中 | [36] |
| MIKE 21 | 长兴岛附近海域 | 对泥沙变化规律进行预测 | 表明了数值模型可以成功地预测长兴岛附近海域泥沙淤积的规律,为工程设计单位提供指导 | [37] |
| MIKE 21FM、SA 模块 | 长江口杭州湾 | 用 FM 模块建立二维垂向平均潮流数学模型 | 计算结果为溢油模块提供水动力基础数据,建立了长江口二维溢油行为与归宿模型 | [38] |
| MIKE 21 水动力学模型 | 淮河流域洪泽湖 | 模拟了洪泽湖的水位变化过程 | 模型能较好地模拟洪泽湖水位过程,模拟误差均在可接受范围内,且模拟精度可满足计算要求 | [39] |
| MIKE 21FM 模块 | 海口人工岛 | 模拟节制闸门控制下人工岛内湖水系的流态和水体交换情况 | 所建立的数值模型有效模拟了涨、落潮过程中节制闸门开启和关闭状态下人工岛内湖的水动力和水交换特征 | [40] |
| MIKE 21FM 模块 | 巢湖 | 采用水动力和水质模块进行巢湖水动力水质数值模拟,对引江济巢工程方案进行优选 | 经过率定和验证在一定程度上较真实地反映了巢湖水动力和水质变化情况,可用于巢湖水环境综合治理的研究 | [41] |

表7 MIKE URBAN 模型在实际工程中的应用模拟

| 模型 | 模拟区域 | 模拟内容 | 模拟结果 | 参考文献 |
|--------------------------|----------|---|--|------|
| MIKE URBAN、11、21 和 FLOOD | 朝阳区奥运中心区 | 建立雨水系统模型、进行积水预测分析、选定排除出路并分析排除设施和评估排除效果 | 制定了排水应急措施的方法,为制定突发性积水预案奠定了正确的基础 | [47] |
| MIKE URBAN | 世博浦西园区 | 对园区管网情况进行建模,评估运行工况,并对事故预案进行分析 | 使浦西的供水安全得到了保证 | [48] |
| MIKE URBAN、MIKE 11 | 深圳市沙头角片区 | 对评估管网现状并进行风险区的划分,在内涝分析的基础上进行规划方案的制定 | 对管网重现期和内涝风险评估进行计算、校核及优化,以此为方案的制定提供可靠依据 | [18] |
| MIKE URBAN | 上海市中心城区 | 针对不同的情景,对改造设计的内涝风险以及管道超负荷状态进行分析 | 为内涝的快速发现,及其他城区管网的改造评估提出参考依据 | [22] |
| MIKE URBAN | 中国某丘陵城市 | 基于 MIKE URBAN 构建供水管网水力模型,并将其应用于该城市的供水规划分析,对不同规划方案进行评估 | 水力模型作为使用工具能合理地确定管网的更新计划,为管道改造提供支撑与依据 | [49] |

表 8 MIKE 系列模型的耦合应用模拟

| 模型 | 模拟区域 | 模拟内容 | 模拟结果 | 参考文献 |
|------------------------|-----------------|---|---|------|
| MIKE 11、21 和 FLOOD | 澳大利亚墨尔本 | 采用一二维水动力模型和 FLOOD 提出了一个系统评估洪水风险适应选择的框架 | 提供了系统测试各种洪水风险适应措施的可能性,包括从大规模的基础设施变化到分散的水资源管理,再到城市规划政策 | [50] |
| MIKE 11、21 和 FLOOD | 盘锦市辽河口段双台子河感潮河段 | 基于 MIKE 系列软件 MIKE11、21、FLOOD 构建了河流水动力及洪水淹没数值模型,并与物理模型试验相互对比验证 | 数值模型与物理模型模拟结果相近,两者在实际应用中各具特点与优势 | [51] |
| MIKE 11、21、SHE 和 FLOOD | 开封市黄河中下游平原东部 | 将城市排水管网、一维河网与二维产汇流模型进行耦合,实现暴雨各过程间的模拟 | 模拟获得的数据与现场实测数据基本一致,表明该模型构建、模拟参数与基本资料的选取稳定可靠 | [52] |
| MIKE 11、21 和 FLOOD | 北京市亦庄经济技术开发区 | 针对现状和未来人工湿地两种情景,对 1、5 和 10 年重现期雨水管网和地面径流进行集成模拟 | 利用这模拟结果进行风险评估,并进行不同方案的分析对比,以此寻找减轻损失的最优方法 | [53] |
| MIKE URBAN、11 和 FLOOD | 某开发区 | 利用 Mike Urban、Mike21 及 Mike Flood 模型对管网运行情况及内涝风险进行评价 | 提出了基于已建雨水排水系统规划设计标准提升的低影响开发雨水系统的设计规模,并提出了相应的规划控制指标 | [54] |

表 9 MIKE BASIN 模型在实际工程中的应用模拟

| 模型 | 模拟区域 | 模拟内容 | 模拟结果 | 参考文献 |
|---------------------------|----------|--|--|------|
| MIKE BASIN | 吉林市第二松花江 | 应用模型模拟降雨径流量,建立概化的流域供需水网络节点,进行不同用户水量预测计算 | 为吉林市水资源合理配置和经济可持续发展提供决策依据 | [25] |
| 基于 ArcGIS 和 MIKE BASIN 模型 | 还乡河 | 对流域内的污染负荷产出量和通量进行模拟,给出流域流出系数及距离衰减系数 | 模型可以比较精确地模拟流域的实时污染负荷通量,计算出负荷总量,将其应用于水环境管理中,为污染负荷研究提供新的思路方法 | [55] |
| MIKE BASIN | 龙潭水利工程 | 对复杂水库群模型进行了简化和等效替换,结合编程使多功能水库群的水资源配置成功计算 | 通过验证发现,该模型对龙潭水利工程水库群调度现状有很好的模拟效果 | [56] |
| MIKE BASIN | 大凌河流域 | 运行模型得到流域、节点、用水户、水库等结果,提取出每个用水户的回水量、耗水量和缺水量等时间序列值进行平衡分析计算 | MIKE BASIN 模型的建立为日后资源的综合管理和规划提供了科学有效的方法 | [27] |

MIKE BASIN 进行复杂水库水资源配置计算时,如果没有对模型进行二次开发,无法考虑水库群间补偿调节及互相错峰的作用,因此计算结果会产生偏差^[56],虽然 MIKE BASIN 设有 VB 接口,但使用者一般难以完成^[58]。故该软件大多是用于单一水

库或单纯的串并联水库计算上。

3.6 MIKE SHE 的应用进展

MIKE SHE 模型可应用于多种水文环境模拟,具有灵活性、通用性高和操作简单的特性及优势,应用见表 10。

表 10 MIKE SHE 模型在实际工程中的应用模拟

| 模型 | 模拟区域 | 模拟内容 | 模拟结果 | 参考文献 |
|----------|--------------|--|--|------|
| MIKE SHE | 灞河流域 | 采用模型对流域径流进行模拟研究,利用 ArcGIS 等技术建立了模型数据库,对模型参数进行了率定和验证,使用多目标对模型适用性进行了评价 | 年径流模拟效果比较好,模型在灞河流域的适用性较好,研究所率定的参数可为进一步研究灞河流域水资源利用与管理提供依据 | [58] |
| MIKE SHE | 丹麦 Skjern 流域 | 基于 MIKE SHE 建立流域地表水-地下水耦合模型,并运用观测值进行参数率定 | 可判断气候类型,地下水补给时间、地下水位埋深等,模拟流域效果较好具有一定适用性和应用前景 | [59] |
| MIKE SHE | 喀斯特流域 | 利用 MIKE SHE 模拟技术,结合该流域独特的地质水文特性,对模型的相关参数进行率定,模拟了 5 场典型洪水的降水径流过程 | 在同一下垫面和模拟条件下,增加累计降水时间,相同降水量产生的径流总量随之增加,最大流量的出现时间相对滞后 | [60] |

MIKE SHE 已经有了成熟的理论研究并仍在继续改进和完善,但由于对计算精度和资料条件有很高要求,故在实际问题应用中也存在较多的局限,测量技术和资料具备程度与模拟条件之间的差距问题,在日后研究中还需要再做改进^[7]。

4 结论与展望

MIKE 模型发展至今已经是较为成熟的模型,并在城市及流域水资源、水环境、水生态及水安全等研究方面有成功应用,在实际工程的应用中有相对成熟的经验可供参考借鉴。但在模型运用过程中也存在局限性,有诸多方面需进一步优化:(1) MIKE 模型在我国的应用和研究起步较晚,且模拟应用较多,研究开发较少。因此借鉴国外经验进行模型研发是目前国内的一个重点工作;(2) MIKE 模型常需要结合 GIS 技术进行数据的前期处理,但其模型自身并不具备此功能,只是将 GIS 作为分析处理工具,因此将 GIS 内嵌到 MIKE 模型之中将是一个发展趋势;(3) 国内基础数据比较缺乏,因此对参数的地域适用性还需深入探讨,获取针对我国具体情况的实测参数,使参数得到优化,从而推进 MIKE 模型在我国的应用;(4) 我国的实测数据资料不够完善,而使用 MIKE 模型进行区域模拟时对数据资料的要求较高,因此无充足资料或无资料地区数值模拟的研发是模型进一步发展的方向。

参考文献:

[1] SETO K C, FRAGKIAS M, GÜNERALP B, et al. A meta-analysis of global urban land expansion[J]. PloS one,

2011,6(8):e23777.

- [2] 张蓓,李家科,李亚娇.不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J].环境科学与技术,2017,40(8):87-95.
- [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.
- [4] 陈雪冬,邱勇,周卫霞,等.基于 HEC-RAS 和 MIKE 11 的山区天然河道水面线数值仿真[J].人民珠江,2014,35(3):116-118.
- [5] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例[J].港工技术,2010,47(5):1-5.
- [6] 姚双龙.基于 MIKE FLOOD 的城市排水系统模拟方法研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [7] 万增友. MIKE SHE 模型国内应用现状及其关键问题研究[J].科协论坛,2011(5):99-101.
- [8] 朱茂森.基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型[J].水资源保护,2013,29(3):6-9.
- [9] WANG Qinggai, WANG Yaping, LU Xuchuan, et al. Impact assessments of water allocation on water environment of river network: Method and application[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c, 2017, 103: 101-106.
- [10] 张斯思.基于 MIKE11 水质模型的水环境容量计算研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [11] 刘伟,刘洪超,徐海岩.基于 MIKE11 模型计算河流水功能区纳污能力方法[J].东北水利水电,2009,27(8):69-70+72.
- [12] AHMED E S M S, MAYS L W. Model for determining real-time optimal dam releases during flooding conditions[J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 1849-1861.
- [13] 沈洋,王佳妮.基于 MIKE 软件的溃坝洪水数值模拟[J].水电能源科学,2012,30(6):56-58+37.
- [14] Danish Hydraulic Institute. Water and environment. MIKE

- 21 scientific documentation[Z]. Denmark:DHI,2007.
- [15] 满霞玉,李丽,顾雯,等.城市内涝积水点分布模拟及治理策略初探[J].水电能源科学,2017,35(3):67-70.
- [16] 宋翠萍,王海潮,唐德善.暴雨洪水管理模型SWMM研究进展及发展趋势[J].中国给水排水,2015,31(16):16-20.
- [17] 韩君良.基于Mike Urban的小城市排水内涝规划[D].杭州:浙江工业大学,2015.
- [18] 王乾勋,赵树旗,周玉文,等.基于建模技术对城市排水防涝规划方案的探讨——以深圳市沙头角片区为例[J].给水排水,2015,51(3):34-38.
- [19] 王世旭.基于MIKE FLOOD的济南市雨洪模拟及其应用研究[D].山东:山东师范大学,2015.
- [20] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage[J]. Environmental Modelling & Software,2007,22(3):394-405.
- [21] ZHOU Qianqian. A Review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts[J]. Water,2014,6(4):976-992.
- [22] 谢家强,廖振良,顾献勇.基于MIKE URBAN的中心城区内涝预测与评估——以上海市霍山-惠民系统为例[J].能源环境保护,2016,30(5):44-49+37.
- [23] 许月卿,邵晓梅,刘劲松.河北省水旱灾害发生情况统计分析[J].国土与自然资源研究,2001(2):6-8.
- [24] 秦年秀,姜彤.基于GIS的长江中下游地区洪灾风险分区及评价[J].自然灾害学报,2005,14(5):5-11.
- [25] 王蕾,肖长来,梁秀娟,等.MIKE BASIN模型在吉林市水资源配置方面的应用[J].中国农村水利水电,2014(1):128-131.
- [26] 王晓妮,王晓昕,侯琳.MIKE BASIN模型在松花江流域的应用研究[J].东北水利水电,2011,29(4):4-5+71.
- [27] 吴俊秀,李红英,刘革.应用MIKE BASIN模型规划调配大凌河流域水资源[J].水土保持应用技术,2011(1):23-25.
- [28] REFSGAARD J C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models[J]. Journal of Hydrology,1997,198(1-4):69-97.
- [29] XIE Xianhong, CUI Yuanlai. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice[J]. Journal of Hydrology,2011,396(1):61-71.
- [30] 李洋,潘明祥,陈燕.数值模型在长江流域一级河网中的模拟应用[J].环境科学与技术,2010,33(S2):531-534+565.
- [31] AHMED F. A hydrodynamic model for the Lower Rideau River[J]. Natural Hazards,2010,55(1):85-94.
- [32] LIN H U, WEI L U, ZHANG Z K. Application of MIKE11 model in water quality early-warning and protection in Dongtiaoxi water source[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2016,31(1):28-36.
- [33] JIANG Yue, ZHANG Haiping, CHEN Ling. Simulating the effectiveness of water diversion project in Chaohu City, Anhui Province[C]//International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. IEEE,2010:1-4.
- [34] 周兴波,陈祖煜,陈淑婧,等.基于MIKE 11的堰塞坝溃决过程数值模拟[J].安全与环境学报,2014,14(6):23-27.
- [35] 连阳阳.基于MIKE一二维耦合的安康城市洪水风险图编制研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2016.
- [36] MORIANOU G G, KOURGIALAS N N, KARATZAS G P, et al. Hydraulic and sediment transport simulation of Koiliaris River using the MIKE 21C model[J]. Procedia engineering,2016,162:463-470.
- [37] 陈雪峰,王桂莹.MIKE 21 计算软件及其在长兴岛海域改造工程上的应用[J].大连大学学报,2007,28(6):93-98.
- [38] 宋泽坤,程和琴,刘昌兴,等.长江口溢油数值模拟及对水源地影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(8):1055-1063.
- [39] 梁云,殷峻暹,祝雪萍,等.MIKE21水动力学模型在洪泽湖水位模拟中的应用[J].水电能源科学,2013,31(1):135-137+99.
- [40] 崔成,张义丰,左书华,等.人工岛内湖水体交换数值模拟研究[J].水道港口,2015,36(6):515-522.
- [41] 张虎,徐学军,代涛.MIKE21 FM在引江济巢工程规划中的应用[J].水电能源科学,2016,34(9):103-106+93.
- [42] SHEN H T, YAPA P D. Oil slick transport in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988,114(5):529-543.
- [43] KOROTENKO K A, MAMEDOV R M, MOOERS C N K. Prediction of the transport and dispersal of oil in the south caspian sea resulting from blowouts[J]. Environmental Fluid Mechanics,2001,1(4):17-24.
- [44] SEMADENI-DAVIES A, HERNEBRING C, SVENSSON G, et al. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system[J]. Journal of Hydrology. 2008,350(1-2):100-113.
- [45] MARK O, LACOURSIÈRE J O, VOUGHT L B M, et al. Application of hydroinformatics tools for water quality modeling and management: case study of Vientiane, Lao P. D. R[J]. Journal of Hydroinformatics. 2010,12(2):161-171.
- [46] APIRUMANEKUL C, MARK O. Modelling of urban flooding in Dhaka City[C]//Proceedings of 4th DHI Software Conference. 2001:101-108.
- [47] 马洪涛,张晓昕,王强.基于模型的城市道路积水应急排水措施研究[J].城市道桥与防洪,2008(9):42-45+6-7.
- [48] 韩冰,张明德,王艳.世博浦西园区供水管网系统水力

- (质)模型的建立及其研究[J]. 净水技术, 2011, 30(3):78-82.
- [49] 郑祎, 吕金燕, 洪德松, 等. 管网水力模型在城市供水规划中的应用[J]. 山西建筑, 2014, 40(9):134-135.
- [50] LÖWE R, URICH C, DOMINGO N S, et al. Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations - a new generation of urban planning Tools[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550:355-367.
- [51] 李伟, 刘冬梅, 赵博. 河闸泄流特性及对应洪水淹没范围模拟试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(18):96-100+105.
- [52] 侯燕, 马山玉. 基于 MIKE 与 GIS 的城市洪水风险分析及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11):72-76.
- [53] 徐速. 城市雨水管网与地面流的一、二维集成模拟研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9):71-73+77.
- [54] 王文亮, 边静, 李俊奇, 等. 基于模型分析的低影响开发提升城市雨水排水标准案例研究[J]. 净水技术, 2015, 34(4):100-104.
- [55] 曹东卫. 基于 ArcGIS 和 MikeBasin 模型的还乡河流域污染负荷通量估算[J]. 水科学与工程学报, 2015(1):64-67.
- [56] 杜倩, 苗伟波. 基于 Mike Basin 的复杂水库群联合调度模型研究[J]. 人民长江, 2016, 47(4):88-92.
- [57] 莫铠, 李军, 贾鹏. MIKE BASIN 水资源模型对复杂水库调度程序的开发及应用[J]. 水科学与工程学报, 2008(5):24-27.
- [58] 田开迪, 沈冰, 贾宪. MIKE SHE 模型在灞河径流模拟中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):91-95.
- [59] 卢小慧, 李奇龙. 基于 MIKE SHE 模型的流域地下水水文响应[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(1):11-15+20.
- [60] 李静, 焦树林, 梁虹, 等. 基于 MIKE SHE 分布式水文模型的降水时间尺度对喀斯特流域径流模拟的影响研究——以红水河系六硐河流域为例[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4):388-394.

(上接第 70 页)

- [13] 徐华山, 徐宗学, 刘品. 漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选[J]. 环境科学, 2013, 34(3):882-891.
- [14] 石雯倩. 汤浦水库流域水质变化及污染物总量控制模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [15] 付意成, 臧文斌, 董飞, 等. 基于 SWAT 模型的浑太河流域农业面源污染物产生量估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):1-8.
- [16] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. 环境科学, 2018, 39(1):77-88.
- [17] GREEN C H, GRIENSVEN A V. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds [J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(4):422-434.
- [18] 姜德娟, 王琼, 李瑞泽, 等. 基于 SWAT 模型的小清河流域总氮输出模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6):1-7.
- [19] 李家科, 杨静媛, 李怀恩, 等. 基于 SWAT 模型的陕西沔河流域非点源污染模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4):11-17.
- [20] 马放, 姜晓峰, 王立, 等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2):610-618.
- [21] 高正, 黄介生, 曾文治, 等. 基于 SWAT 模型的清江长阳段非点源污染及其控制方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9):174-177.