

入河排污口设置对水功能区 环境影响数值预测

徐秀丽¹, 吴璐璐¹, 沈 优², 崔冬梅³

(1. 江苏省水文水资源勘测局泰州分局, 江苏 泰州 225300; 2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005;
3. 泰州市水资源管理处, 江苏 泰州 225300)

摘要:结合江苏泰州姜堰区白米镇污水处理厂排污口在引水工况下的影响范围,综合新通扬运河、白米河、中心河及曹红喜河的水文水质资料,基于 MIKE21FM 模型,在研究区范围建立了 COD_{Cr}、NH₃-N 污染物扩散数值模型,并利用实测流速及水质数据,对模型进行验证和参数率定,模拟了引水工况下尾水正常排放及事故排放的污染物输移过程,并对直接受纳的曹红喜河和尾水流经的中心河和白米河进行影响分析。

关键词:MIKE21; 污水处理厂; 入河排污口; 水功能区

中图分类号:TV85 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2022)02-0029-05

Numerical prediction of environmental impact of setting of sewage outlets into river on water function zone

XU Xiuli¹, WU Lulu¹, SHEN You², CUI Dongmei³

(1. Taizhou Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Taizhou 225300, China;
2. Huai'an Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Huai'an 223005, China;
3. Taizhou Water Resources Management Office, Taizhou 225300, China)

Abstract: Combined with the influence scope of the sewage treatment plant in Baimi Town, Jiangyan District, Taizhou City, Jiangsu Province under water diversion conditions, Based on the hydrology and water quality data of Xintongyang Canal, Baimi River, Zhongxin River and Caohongxi River, and MIKE21FM model, a COD_{Cr} and NH₃-N pollutant diffusion numerical model was established in the study zone. Using the measured flow velocity and water quality data, the model was verified and parameters were calibrated, and the pollutant transport process of normal tailwater discharge and accidental discharge was simulated under water diversion conditions, and the influence of Caohongxi River and Zhongxin river and Baimi River through which the tail water directly received was analyzed.

Key words: MIKE21; sewage treatment plant; sewage outlet into river; water function zone

入河排污口作为控制污染物入河的最后一道关口,在流域水资源保护管理工作中具有重要地位。因此,合理地布置入河排污口,综合预测评估污水排放对周边水功能区环境影响范围,能够有效保障生活、生产和生态用水安全,同时也兼顾了对

生态资源的保护。

目前,国内外常采用数值模拟的方法来模拟流域内污染物的迁移转化过程,从而归纳出污染物的时空分布规律,为流域水环境问题的治理提供参考依据。目前一般常用于地表水的水环境数值模型

收稿日期:2021-11-20

作者简介:徐秀丽(1992—),女,工程师,硕士,主要从事水情分析预报工作。E-mail:1516314002@qq.com

包括 EFDC^[1]、WASP^[2]、MIKE^[3] 等,其中由丹麦水环境研究所建立的水环境模型系统 MIKE 有着强大的兼容性,其包含的二维非稳态水质模型既能描述水质沿程变化,也能反映平面污染物扩散趋势,因此被广泛用于水环境影响预测^[4]。李亚娟等^[5]应用 MIKE21 建立了湿地植物的水质模块,将植物的阻流、产氧、耗氧及微生物和植物吸收营养盐过程参与计算中,耦合湿地水动力实现水质模拟;XIANG 等^[6]通过 MIKE21 应用于特定平原水库,以寻找最佳人工岛参数,模拟的波高衰减结果与经验预测值吻合良好。张宇航等^[7]利用 MIKE21 软件,基于水动力和水质模型耦合,采取不同策略的情景假设,对密云水库总氮进行研究,提出最优方案。

本文以江苏泰州市姜堰区白米镇污水处理厂排污口所在河网地区为例,应用 MIKE21AD 模块分析了不同工况下扩建入河排污口对水环境的影响范围和程度。同时对直接接纳的曹红喜河和尾水流经的中心河和白米河进行影响分析,以评估尾水按正常达标排放和事故排放对曹红喜河、中心河和白米河的影响程度,为后期有针对性改善曹红喜河、中心河和白米河水环境质量提供依据,以尽可能减小尾水排放对流经河道的影响。

1 区域概况

泰州市地处长江三角洲平原的北缘,西至扬州 52 km,南距长江 20 km,其所在的姜堰区位于苏中平原南部,地面高程介于 4.5~6.5 m 之间,系长江冲积平原。姜堰区境内河网密布,河道纵横交错,水面面积 176 km²,约占全区土地面积 19%。通南地区东西向河道主要有通扬运河、周山河、生产河、南干河等,南北向河道主要有葛港河、中干河、西姜黄河、东姜黄河。扬运河、中心河、周山河;南北向主要河道有运粮河、孔庄河、胜利河、甸河、白米河、东姜黄河。白米镇属季风影响下的副热带湿润性气候,寒暑变化显著,四季分明,雨量充沛,气候温和,无霜期长。常年平均气温 14.9℃,年均降水量 1 026.8 mm,年均蒸发量 1 047.5 mm,平均相对湿度 79%。

2 水动力数学模型

MIKE(AD) 模型的污染物对流扩散模块能将二维水动力计算与污染物迁移计算相结合,可很好地反映污染物在河流中的运动规律。基于本次研究区域河道断面较窄、流速较小的特征,考虑扩散

作用的影响,本次选择 MIKE21 FM 模型构建区域河网水环境数学模型。

MIKE21 污染物对流扩散模块控制方程由描述水流运动的 N-S 方程和描述污染物质对流扩散的对流扩散方程组成。其中,前者由水流连续性方程、沿水流方向(x 方向)的动量方程和垂直水流方向(y 方向)的动量方程组成。模型服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定。二维非恒定浅水方程组为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} \quad (2)$$

其中将式(2)进一步与式(3)建立等式:

$$fh\bar{v} - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (3)$$

除式(1)、(2)以外,还包括式(4)中的控制方程:

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} \quad (4)$$

同样进一步与式(5)建立等式:

$$-f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (5)$$

式中: t 为时间; x 、 y 为笛卡尔坐标系; η 为水面相对于未扰动水面的高度即通常所说的水位; h 为总水深; u 、 v 分别为流速在 x 、 y 方向上的分量; p_a 为当地大气压; ρ 为水密度, ρ_0 为参考水密度; $f=2\omega\sin\varphi_g$ 为科式力参数(其中 ω 为地球自转角速率, φ 为地理纬度; g 为重力加速度; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} 分别为辐射应力分量; S 为源汇项; (u_s, v_s) 为源汇项水流流速。字母上带横杠的是平均值, T_{ij} 为水平黏滞应力项,包括黏性力、紊流应力和水平对流,这些量是根据沿水深平均的速度梯度用涡流黏性方程得出的:

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

尽管如此,根据式(1)~(8)还无法求得其理论解,只能采用数值解方法求得近似解,本次采用有

限体积法对其进行求解计算,细分为不重叠的单元,单元可以是任意形状的多边形,本次只考虑三角形单元。

3 模型建立和参数标定

3.1 模型预测因子

根据对新通扬运河姜堰白米农业用水区现状主要污染物进行监测分析,确定水质影响因子为 COD_{cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

3.2 模型概化

基于对研究区域内河网现状情况的资料收集和调研,本次研究针对白米镇扩建排污口建成后尾水主要受纳水体进行河网概化。将主要的输水河道纳入计算范围,共概化河道 5 条,主要包括曹红喜河、中心河、白米河、新通扬运河及支流杨涵河,河道长度共计 23.45 km。岸线及水下地形数据来自于白米镇水系图及河道断面图,计算域内节点数为 3 478 个,网格数为 3 893 个。

3.3 边界条件设置

边界条件是河网数学模型的主要约束条件,本模型考虑了 2 种边界属性,分别为外部边界和内部边界。外部边界指控制计算区域内、外水体交换的约束条件;内部边界指的是模型计算范围内、以点源或面源形式给出的取、排水口和支流等。模型中共设置 6 个外部边界和 1 个内部边界,如图 1 所示,采用新通扬运河、白米河、中心河、曹红喜河上断面作为 4 个上游边界,新通扬运河、中心河下断面作为 2 个下游边界,白米镇污水处理厂排污口作为一个单独源汇项。

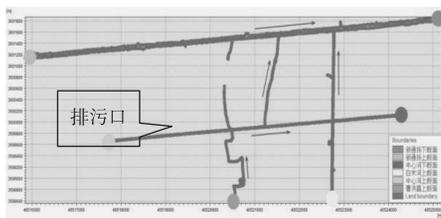


图1 边界分布示意

3.4 计算参数选取

本次模型搭建与率定选取入河污染物 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为河段污染物因子,选取 2020 年 7 月 15 日各边界断面 4 次流速测量的平均值作为实测流速,进行参数率定。模型采用曼宁糙率系数,取值 20 ~ 37。时间计算步长根据模型网格大小、水深条件动态调整模型,使 CFL 数小于 0.8,计算时间步长为 1 min。此外,本次模型中水平扩散系数取 $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$,

且在综合考虑相关文献研究成果的基础上进行参数率定,确认 COD_{cr} 降解系数取 $0.12/\text{d}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解系数取 $0.10/\text{d}$ 。

3.5 模型验证

3.5.1 水动力计算验证

本文利用河道实测流速来与模型计算结果进行对比验证。资料采用 2020 年 7 月 15 日的实测值,于 8 h、11 h、14 h、17 h 对各边界断面的流速进行测量,将实测流速平均值与模型计算值进行对比,验证结果见表 1。表中实际流速平均值与模型计算的流速平均值偏差绝对值小于 20%,表明本文的 MIKE21 模型能够满足对水动力的计算精度。

表1 模型计算流速与实测值对比结果

监测点名称	实测流速平均值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	模型计算值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	偏差率/%
曹红喜河	0.017	0.015	-11.76
白米河	0.088	0.090	2.27
中心河	0.031	0.035	12.90

3.5.2 水质计算验证

针对研究范围内现状地表水水质污染以有机物污染为主的特点,以 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为研究对象,模拟了区域河网内的 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度时空分布,并将其与布设的 9 个断面实测资料进行验证,详见表 2。从验证的水质浓度偏差率可以看出,模拟计算值与实测值的偏差率小于 20%,浓度变化趋势也比较合理,表明利用 MIKE21 模型能够满足本次计算要求。

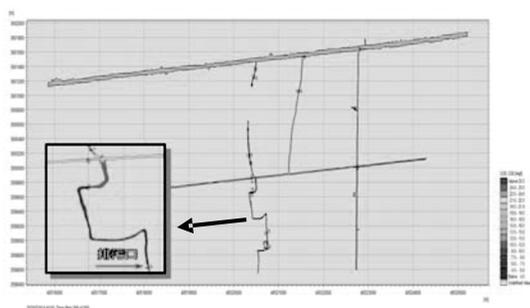
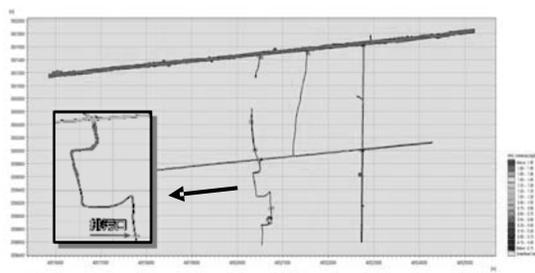
4 水质模拟预测与影响分析

4.1 尾水正常排放下污染物浓度分布模拟

在尾水达标排放情况下,分别对现状和水功能区两种边界水质条件模拟研究区域污染物分布,边界水文条件设定为河道设计水文条件,并假设沿途无其他污染物汇入。图 2 为尾水正常排放下模拟 COD_{cr} 质量浓度分布图(现状条件)。图 3 尾水正常排放下模拟 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度分布图(现状条件)。由图可知在现状水质边界条件下,排污口下游至曹红喜河与中心河交界处,水污染物质量浓度 COD_{cr} 为 24.63 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 1.797 mg/L ,评价为 V 类水;至中心河与白米河交界处,水污染物质量浓度为 COD_{cr} 为 19.43 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 1.061 mg/L ,评价为 IV 类水。至白米河与新通扬图 4 运河交界处,

表2 水质浓度模型计算流速与实测值对比结果

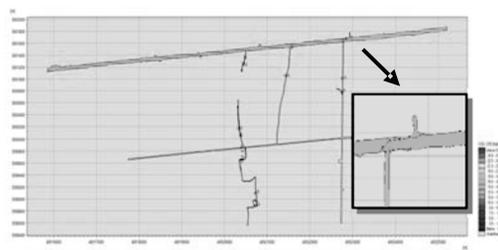
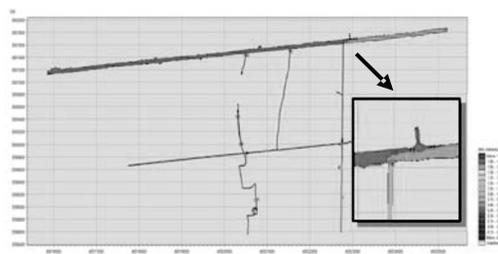
断面编号	断面 所在河流	实测水质值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		模型计算值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		偏差率/%	
		COD_{cr}	$\text{NH}_3\text{-N}$	COD_{cr}	$\text{NH}_3\text{-N}$	COD_{cr}	$\text{NH}_3\text{-N}$
J1		21.0	0.4835	22.60	0.534	7.62	10.44
J2		18.5	0.2760	19.80	0.271	7.03	-1.81
J3	曹红 喜河	25.5	0.3545	21.20	0.316	-16.86	-10.86
J4		17.0	0.3690	20.30	0.429	19.41	16.26
J5		17.5	0.3305	18.80	0.353	7.43	6.81
J6	中心河	21.0	0.3590	22.60	0.317	7.62	-11.7
J8	白米河	19.0	0.2650	18.21	0.297	-4.16	12.08
J9		18.0	0.3375	17.54	0.324	-2.56	-4

图2 尾水正常排放下模拟 COD_{cr} 质量浓度分布
(现状条件)图3 尾水正常排放下模拟 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度分布
(现状条件)

水污染物质量浓度为 COD_{cr} 为 15.62 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 0.640 mg/L , 评价为 III 类水。

为尾水正常排放下模拟 COD_{cr} 质量浓度分布图(水功能区条件)。图 5 尾水正常排放下模拟 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度分布图(水功能区条件)。由图可知,在水功能区水质边界条件下,排污口下游至曹红喜河与中心河交界处,水污染物质量浓度 COD_{cr} 为 24.61 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 1.797 mg/L , 评价为 V 类水;至中心河与白米河交界处,水污染物质量浓度为 COD_{cr} 为 19.70 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 1.087 mg/L , 评价为 IV 类水;至白米河与新通扬运河交界处,水污

染物质量浓度为 COD_{cr} 为 19.35 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 1.006 mg/L , 评价为 IV 类水。

图4 尾水正常排放下模拟 COD_{cr} 质量浓度分布
(水功能区条件)图5 尾水正常排放下模拟 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度分布
(水功能区条件)

4.2 尾水事故排放下污染物浓度分布模拟

为模拟尾水事故排放情况下污染物质量浓度分布情况,设置 1 h、6 h、12 h、24 h 4 种响应时间,分别对现状和水功能区 2 种边界水质条件模拟研究区域污染物分布,边界水文条件设定为河道设计水文条件,并假设沿途无其他污染物汇入。为节约篇幅,本文只将模拟排放 24 h 的污染物分布情况进行分析。图 6 为尾水事故排放下模拟 24 h COD_{cr} 质量浓度分布图(现状条件)。图 7 为尾水事故排放下模拟 24 h $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度分布图(现状条件)。如图 8 所示,现状水质边界条件下事故排放 24 h 后恢复

正常排放,排污口下游至曹红喜河与中心河交界处,水污染物最大质量浓度 COD_{cr} 为 89.12 mg/L, NH_3-N 为 10.522 mg/L,评价为劣 V 类水;至中心河与白米河交界处,水污染物最大质量浓度为 COD_{cr} 为 27.88 mg/L, NH_3-N 为 2.339 mg/L,评价为劣 V 类水;至白米河与新通扬运河交界处,水污染物最大质量浓度为 COD_{cr} 为 17.69 mg/L, NH_3-N 为 1.006 mg/L,评价为 IV 类水。

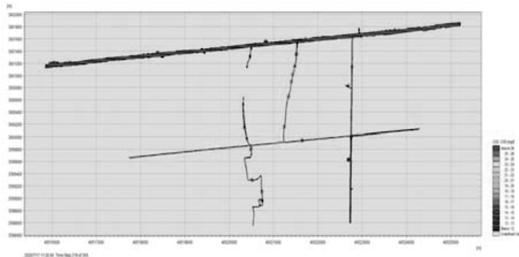


图6 尾水事故排放下模拟 COD_{cr} 质量浓度分布(现状条件)

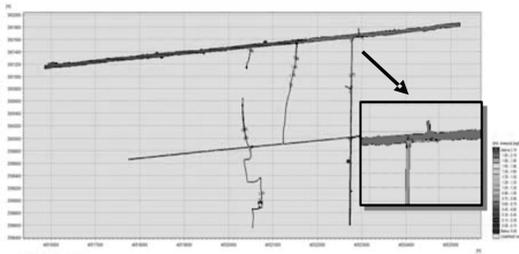


图7 尾水事故排放下模拟 NH_3-N 质量浓度分布(现状条件)

图8为尾水事故排放下模拟24h COD_{cr} 质量浓度分布图(水功能区条件)。图9为尾水事故排放下模拟24h NH_3-N 质量浓度分布图(水功能区条件)。由图可知,在水功能区水质边界条件下,事故排放24h后恢复正常排放,排污口下游至曹红喜河与中心河交界处,水污染物最大质量浓度 COD_{cr} 为 89.12 mg/L, NH_3-N 为 10.523 mg/L,评价为劣 V 类水;至中心河与白米河交界处,水污染物最大质量浓度为 COD_{cr} 为 28.14 mg/L, NH_3-N 为 2.365 mg/L,评价为劣 V 类水;至白米河与新通扬运河交界处,水污染物最大质量浓度为 COD_{cr} 为 21.42 mg/L, NH_3-N 为 1.346 mg/L,评价为 IV 类水。

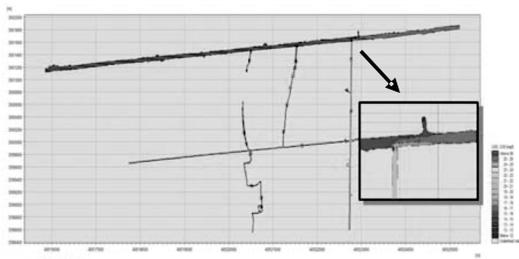


图8 尾水事故排放下模拟 COD_{cr} 质量浓度分布(水功能区条件)

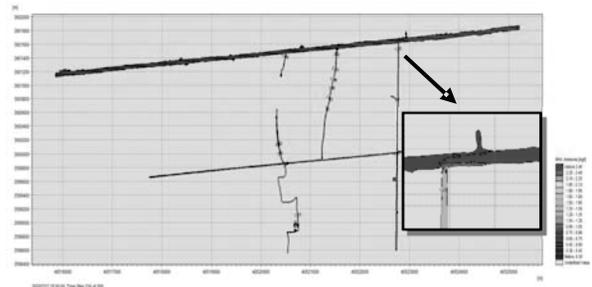


图9 尾水事故排放下模拟 NH_3-N 质量浓度分布(水功能区条件)

5 结论

MIKE21FM 模型能够较好地模拟尾水水力、水质的运动和迁移情况。在尾水正常排放工况中,现状水质边界条件下,排污口尾水排放下游曹红喜河全段水质由 IV 类降为 V 类,中心河、白米河水质仍为 IV 类,朱楼桥国考断面、新通姜堰白米农业用水区末端处水质仍为 III 类。功能区水质边界条件下,排污口尾水排放处水质由 IV 类降为劣 V 类,曹红喜河水质由 IV 类降为劣 V 类,中心河、白米河水质仍为 IV 类,朱楼桥国考断面、新通姜堰白米农业用水区末端处水质仍为 III 类。

在尾水事故排放情况下,根据现状水质条件设置边界得到朱楼桥国考断面处水质评价为 III 类水,新通扬运河姜堰白米农业用水区末端处水质评价为 III 类水。而根据水功能区水质条件设置边界得到朱楼桥国考断面处水质评价为 III 类水,新通扬运河姜堰白米农业用水区末端处水质评价为 III 类水。

参考文献:

- [1] 姜利兵,王敏,郜学军. 基于 EFDC 的马莲河水库水质模拟分析[J]. 能源与环境, 2021(5):89-91.
- [2] 赵子豪,姚建. 基于 WASP 模型的山区型河流污水污染控制研究[J]. 人民长江, 2021, 52(增刊1):38-41.
- [3] 徐帅,张凯,赵仕沛. 基于 MIKE21FM 模型的地表水影响预测[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(增刊1):386-390.
- [4] 黄燕,陈娟,李杰. 二维水质模型在入河排污口设置中的应用[J]. 人民黄河, 2013, 35(8):60-63.
- [5] 李亚娟,杜彦良,毕二平,等. 妫水河湿地植物作用及调水水质响应模拟[J]. 环境科学, 2020, 41(9):4095-4104.
- [6] XIANG Y, FU ZM, MENG Y, et al. Analysis of wave clipping effects of plain reservoir artificial islands based on MIKE21 SW model[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(3): 179-187.
- [7] 张雨航,孙长虹,范清,等. 基于 MIKE21 的密云水库总氮预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8):122-131.