

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.021

# 基于 MIKE 对流扩散和生态耦合模型的 鸭子荡水库水质模拟研究

刘江<sup>1</sup>, 陈国鼎<sup>2</sup>, 曾继军<sup>1</sup>, 李国栋<sup>2</sup>

(1. 宁夏宁东水务有限责任公司, 宁夏 银川 750000; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 由于传统的水质监测存在低效、失准等缺点,故采用数值模拟的方式计算和评价鸭子荡水库水质状况。对鸭子荡水库水质实测数据进行统计并分析水质状况,通过耦合 MIKE 软件对流扩散模型和生态模型(Ecolab)建立数值模型并对 2012 年水库水质进行模拟计算,验证了模型和相关参数设置的合理性,得出了 DO、COD、氨氮浓度时间和空间的分布规律。研究表明,鸭子荡水库水体属 I 类水质,溶氧量处于稳定状态,污染物呈现由入库处至出库处递减趋势,并且具备承载 10 倍污染物浓度入流的能力。结果表明水库对于高浓度污染物入流具备净化能力,数学模型可用来评价水体水质状况及预测未来水质,并为相关研究提供参考。

**关键词:** 水质模拟; MIKE 软件; 污染物; 生态模型; 对流扩散模型

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0118-05

## Water Quality Simulation of Yazidang Reservoir Based on Ecolab in MIKE Software

LIU Jiang<sup>1</sup>, CHEN Guoding<sup>2</sup>, ZENG Jijun<sup>1</sup>, LI Guodong<sup>2</sup>

(1. Ningxia Ningdong Water Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750000, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Considering the shortcomings of the traditional water quality monitoring, the water quality of Yazidang reservoir was calculated and evaluated by numerical simulation. The statistical data of the water quality of the Yazidang reservoir were analyzed, the water quality of the reservoir in 2012 was simulated using the numerical model established by coupling the convection diffusion model and the ecological model (Ecolab) in MIKE software, the rationality of the model and relevant parameter settings was verified, and the distribution rules of DO, COD and NH<sub>3</sub>-N concentration in time and space were obtained. Results show that the water quality of the Yazidang reservoir accords with class I water quality standard, and the dissolved oxygen volume is in a stable state, the pollutants present a decreasing trend from the inlet to outlet, and reservoir has the carrying capacity of 10 times the concentration of pollutants' inflow. The results show that the reservoir has the ability to purify the high concentration of pollutants into the flow. It shows that the mathematical model can be used to evaluate the water quality and predict the future water quality, and provide references for related research.

**Keywords:** water quality simulation; MIKE software; pollutant; ecological model; convection diffusion model

随着社会经济的发展,水质与水环境一直是科学研究的重点目标,人们对水质模型的研究也日益深入。传统的水质分析往往通过连续的取样、检测的方式来监测流域水质的变化。然而污染物存在离散性和明显的时空变化特征,当测站不足时则无法充分覆盖目标流域,同时也无法准确反应区域的水

质状况,并且存在监测周期长、耗资大等问题。由于传统分析方法存在上述弊端,开发水质的数学模型成为关键。目前,常用的水质模型有 WASP、QUAL、QUASAR、MIKE 等,并且已在河流<sup>[1-8]</sup>、湖泊<sup>[9-10]</sup>、水库<sup>[11-12]</sup>、地下水<sup>[13]</sup>等得到了广泛的应用。水质模型涉及变量繁多,物理化学过程复杂,常用到多个

收稿日期: 2017-09-30

修稿日期: 2017-11-04

作者简介: 刘江(1981—),男,宁夏中宁人,助理工程师,主要从事供水工程运行管理工作。E-mail: ndswzjj@163.com

通讯作者: 陈国鼎(1994—),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: 396655932@qq.com

模型的耦合,因此,对水质变量的准确描述和模型参数的率定成为重要环节。周鹏程等<sup>[14]</sup>以深圳市原水系统中的多个水库为例,建立了多参数最优化估值模型,并基于粒子群算法对多库水质联合模拟模型中的水质参数进行优化求解,可为城市原水系统水量水质联合调控提供了参考依据。吴俊锋等<sup>[15]</sup>采用了影响系数法,在二维水动力水质模拟的基础上,以下边界上最大浓度点为控制点,计算区域的水环境容量,并对长江仪征工业用水区的水环境容量进行了计算,得出该河段环境容量。唐国平等<sup>[16]</sup>选用 WASP 模型的 EUTRO 模块对氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、化学需氧量(COD)和总磷(TP)进行模拟计算,并对模型主要参数进行敏感性分析。刘梅冰等<sup>[17]</sup>运用流域日尺度分布式水文模型 SWAT 和二维垂向水动力水质模型 CE-QUAL-W2,构建了山美水库流域水量水质模拟联合模型,并反映山美水库流域及库区水体的水动力和污染过程。水质的数学模型可提高水质评价的效率,更直观准确的体现变量的时空分布特征。

鸭子荡水库作为宁东供水工程的核心,其水体污染物含量是评价水库水质情况的重要指标,也是水库能否正常调度运行的重要依据,因此对鸭子荡水库水质的模拟研究具有重要意义,也是为保证用水安全的迫切需求。本文基于 MIKE 生态模块(Ecolab)与对流扩散模块耦合,同时考虑污染物的对流扩散与衰减,对鸭子荡水库进行水质模拟。计算结果可反映水库水质指标变化过程,并表明水质对高浓度污染物具备自净能力。

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况

鸭子荡水库距宁夏回族自治区银川市约 60 km,地处灵武市,位于东经 105.59°~106.37°,北纬 37.60°~38.01°,属于中温带大陆性季风气候区。作为宁东供水工程的核心,鸭子荡水库也是宁东能源化工基地最重要的基础设施之一,承担着为基地工业、生态、生活提供用水的大任,其安全与正常运行关系着宁东乃至宁夏经济的健康发展。

鸭子荡水库的主要污染物是有机物(COD)和氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),本次研究主要针对溶解氧(DO),COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 三个水质指标进行模拟并探究其规律。

### 1.2 数学的模型建立

#### 1.2.1 对流扩散模型

建立在水动力模型的基础上,污染物的输移和

扩散采用二维对流扩散方程,在 MIKE 中控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(uhC) + \frac{\partial}{\partial y}(vhC) = \frac{\partial}{\partial x}(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_y \frac{\partial C}{\partial y}) - hk_p C + hC_s S \quad (1)$$

式中: $D_x$ 、 $D_y$  分别为  $x$  与  $y$  方向上的扩散系数,  $m^2/s$ ;  $C$  为污染物浓度,  $mg/L$ ;  $S$  为源汇项,  $mg/(L \cdot s)$ ;  $K_p$  为呈线性的衰减率;  $h$  为水深,  $m$ ;  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的流速,  $m/s$ ;  $t$  为时间,  $s$ 。

#### 1.2.2 水质模型

水质模型主要考虑污染物的生化降解反应,并与对流扩散模块耦合。水质中 COD 用于模拟有机质含量,降解符合一级动力学反应规律:

$$\frac{\partial COD}{\partial t} = -k_1 ARRHENIUS20(tetadcod, temp) \cdot COD \quad (2)$$

式中: $k_1$  为 COD 降解系数,  $ARRHENIUS20(tetadcod, temp)$  为温度校正函数,  $tetadcod$  为温度校正常数,  $temp$  为水温,引入温度校正函数的主要原因为 COD 降解系数与水温有密切关系,使模型更加准确。

DO 的生化表达式为:

$$\frac{dDO}{dt} = reaera + phtsyn - respT - sod - nitriDO \quad (3)$$

式中: $reaera$  为大气复氧,  $phtsyn$  为光合作用产氧,  $respT$  为呼吸作用耗氧,  $sod$  为底泥需氧量,  $nitriDO$  为硝化需氧量,  $mg/(L \cdot d)$ 。

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 生化表达式为:

$$\frac{dNH_4^+}{dt} = -plantn - nitri \quad (4)$$

式中: $plantn$  为植物摄取量,  $nitri$  为硝化损耗量,  $mg/(L \cdot d)$ 。

#### 1.2.3 模型参数和定解条件

由于实测数据只记录水库出口处的污染物浓度,因此,缺少水库入流污染物浓度及水库初始污染浓度。为保证计算结果的可靠性,需对水库的污染物浓度做合理性假设。考虑水库的入流为污染物主要来源,污染类型为点源污染。由于入口处污染物浓度未知,可采用假设试算,由于水库水体自身具备溶解氧并且溶氧量存在饱和度,再考虑到溶解氧的生化方程式,DO 浓度整体处于平衡状态,因此入流水体溶解氧数值与出口相似,可采用出流的溶解氧。COD 和氨氮为水体的主要污染物类型,在水库中由于对流扩散和衰减的作用使其浓度降低,因此将浓度提高至 5 倍,作为污染物入流条件进行试算。由

于水库历年入流污染物浓度变化不大,因此选用数据齐全的 2012 年作为模拟对象,并且可根据模拟结果对其余年进行类推,并对未来水质情况进行预测。

在 Ecolab 中,状态变量为:DO, COD,  $\text{NH}_4^+$ ; 风速采用宁夏地区平均风速 3 m/s; 扩散系数:采用涡黏系数为比例因子,均为水平方向,系数为 1; COD 降解系数:  $0.05 \text{ d}^{-1}$ ; 入流条件:点源污染; 初始条件:  $\text{DO} = 10 \text{ mg/L}$ ,  $\text{COD} = 2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ = 0.2 \text{ mg/L}$ , 与年均值接近,较为合理; 模拟时间: 2012 - 01 - 01—2012 - 12 - 31, 为减少初始条件对模拟结果产生的影响,实际模拟时段为 2011 - 10 - 01—2012 - 12 - 31; 求解采用为显示差分格式,由于受到稳定性限制,主时间步长为 3 600 s,实际计算时间步长的取值

采用浮动范围的方式。相应扩散方程的时间步长在模型的计算过程中自动与主时间步长相匹配,浅水方程的时间步长则自动与扩散方程的时间步长相匹配。

## 2 模拟结果

### 2.1 水质概况

水质测点位于水库出水塔附近,主要测量指标为水温、浊度、pH 值等。由于 DO 值部分缺失,无法完成完整统计,但就已有数据分析,其值基本处于区间(7, 15),并且逐年变化甚微。主要污染物指标 COD 和氨氮浓度如图 1 所示。

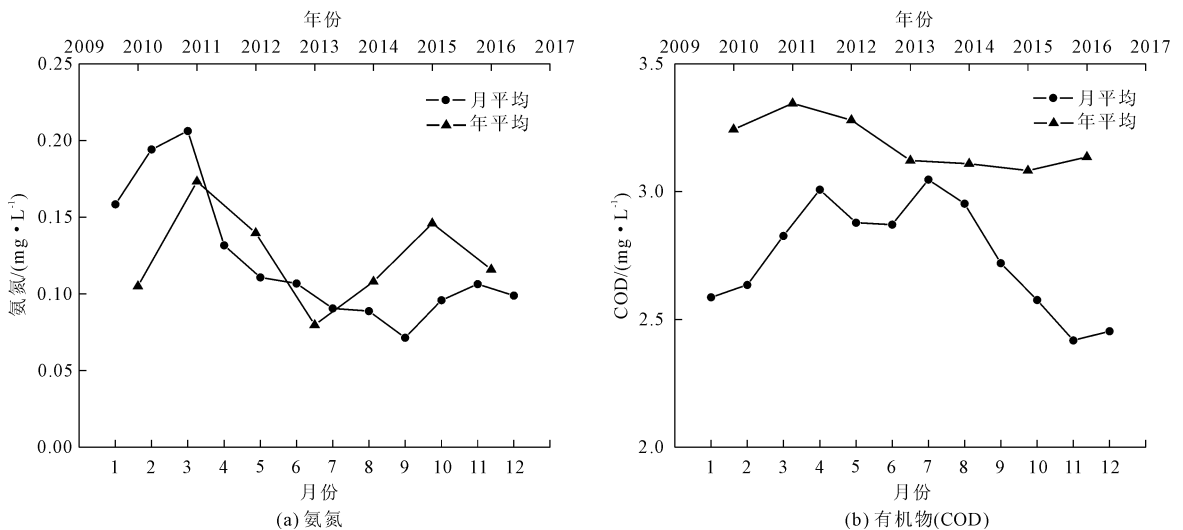


图 1 氨氮(a)和有机物(COD)(b)污染物浓度年平均及月平均变化趋势

由图 1 可知,COD 浓度值整体上处于稳定状态,其值基本分布在 2 mg/L ~ 3 mg/L,从多年平均值图中可以看出 COD 含量随年际变化不大,趋于平稳。从月平均图中可以看出 COD 含量在夏季有轻微的上升,冬季比夏季低,呈现着季节规律性变化。推测其原因可能与水温有关,夏季水温为 20℃左右,接近水生物最适宜活动温度,生物活动较为活跃。水体氨氮含量在多年平均上表现较为稳定,数值大小在 0.80 mg/L ~ 0.18 mg/L。对于氨氮浓度月均值,在 1、2、3 月有显著上升的趋势,其原因尚不明确,原因可能为人类活动有关。

根据《地表水环境质量标准》(见表 1), DO 与 COD 浓度基本达到 I 类水质评价标准,氨氮浓度存在少数时间段处于 II 类水质评价标准,但是大部分时段仍达到 I 类标准。因此,可以判断鸭子荡水库水质状况良好,受污染程度较低。

表 1 地表水环境质量标准

单位:mg/L

分类	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
DO	≥ 7.5	6.0	5.0	3.0	2.0
COD	≤ 15	15	20	30	40
$\text{NH}_4^+$	≤ 0.15	0.50	1.00	1.50	2.00

### 2.2 水质验证

在水库出流处布置测点,监测模型计算结果,并与实测数据对比,对比结果见图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)。

由图 2(a) DO 实测数据与计算数据对比表明,两者趋势保持一致,数值上拟合较好,说明计算结果较为合理。DO 浓度曲线较为平缓,无跳跃点和突变点,原因为由于大气复氧和光合作用的效应,使水体中氧气含量得到补充,因此可以维持氧气浓度值处于较为平稳的状态。并且由于水库水体溶氧量与入流水体溶氧量较为接近,因此受入流条件影响小,影

响 DO 浓度值的主要因素为水温、水生物活性等自然条件,与实际情况接近。水库主要污染物 COD 和  $\text{NH}_4^+$  计算结果与实测数据趋势相似,计算值处于合理范围,根据式(2)、式(4)得 COD 与  $\text{NH}_4^+$  浓度在没有入流时呈衰减状态,浓度值的增减主要取决于入流条件,因此两者浓度受入流影响较大并且曲线震荡较为明显。

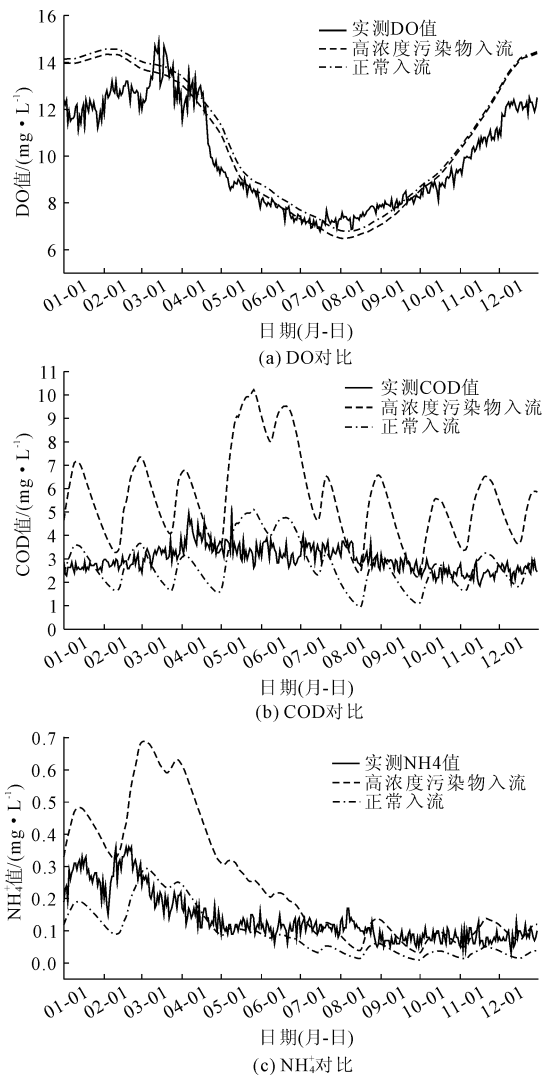


图 2 计算值与实测值对比

### 2.3 污染物区域分布

模拟得到不同时刻的 DO、COD、 $\text{NH}_4^+$  浓度区域分布状况,模拟末期各污染物浓度分布如图 3 所示。

由图 3 表明:DO、COD、 $\text{NH}_4^+$  浓度分布与入流位置与出流位置关系密切,DO 浓度由于水体自身的氧平衡作用,使得水库水体溶氧量整体呈现稳定状态,且分布均匀。COD、 $\text{NH}_4^+$  作为污染物,其浓度变化主要来源依赖于水库入流条件,水库出流位置位于坝前出水塔附近,污染物浓度在坝前处浓度呈环形

分布。沿入流至出流方向上,污染物浓度总体上呈由高到底分布,规律与对流扩散作用相吻合。

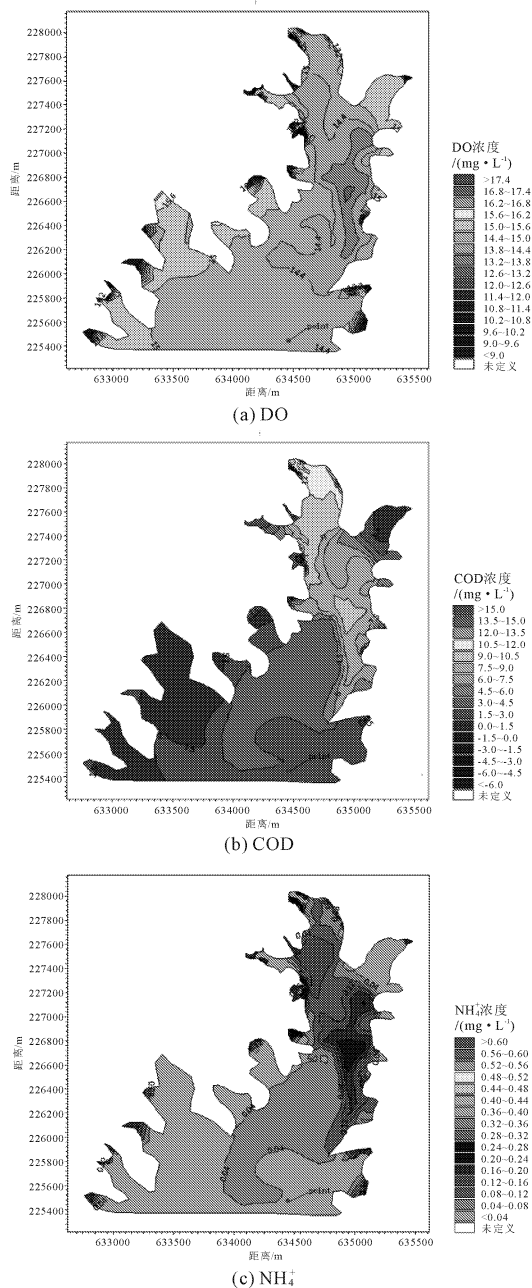


图 3 浓度区域分布

### 2.4 水库污染物承载力分析

为验证水库对水质较差的入流是否具备自净能力,模拟时采取放大入流污染物浓度的方法,记录计算结果,并与实测值进行对比,评价水库的自净能力。模拟条件参数与之前保持一致,将入流污染物浓度提高至 10 倍,在出流处设置测点,计算结果与实测数据对比见图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)。结果表明:将 COD 和  $\text{NH}_4^+$  浓度增加 10 倍后,污染物浓度明显上升,表明入流污染物浓度对计算水质影响较

大。DO 计算结果显示,入流污染物浓度增加后,DO 值有较小的降幅,但趋势保持不变,与正常入流接近。原因为污染物浓度上升后,其化学变化转化量增加,导致需氧量也增加。从 COD 计算结果来看,出口处 COD 浓度有较为明显的增幅,但根据《地表水环境质量标准》,其值依然在 I 类水质范围内,水质状况良好。 $\text{NH}_4^+$  值入流浓度增大 10 倍后,出口处的浓度在时间序列前期明显增加,在后期变化不大,与实测资料接近。氨氮浓度在 3、4 月份出现大于 0.5 的值,根据水质评价标准,属于第 III 类水。在其余月份浓度小于 0.5,属于第 II 类水质,表明水库具备自我净化功能,对于入口处的污染物具备承载力。

### 3 结 论

(1) 鸭子荡水库水质属于 I 类水质,水质状况良好,受污染程度较低,可满足宁东工业生产及居民用水需求。

(2) 水库水体 DO 值趋于平稳,COD 和  $\text{NH}_4^+$  浓度受入流条件影响大;在空间区域上,DO 浓度分布均匀,沿入流至出流方向上,COD 和  $\text{NH}_4^+$  浓度浓度总体上呈由高到底分布。

(3) 对于高浓度污染物的入流条件,鸭子荡水库仍能维持 I 类水质或 II 类水质,水库具备一定的自我净化功能和环境承载力。

(4) 耦合的 MIKE 对流扩散模型和生态模型可用于水库水质的模拟研究,计算结果较为理想,与实测数据接近,可用于水库的水质评价及未来水质预测。

#### 参考文献:

- [1] 矫桂丽,朱丽丽,祖 晶,等.南水北调东线山东段水质监测站点的布设[J].水利规划与设计,2013(6):48-50.
- [2] 于 磊,顾 华,李 垒,等.基于 MIKE21 的大宁水库水质监测站点布设优化[C]//中国水利学会 2014 学术年会论文集(下册),南京:河海大学出版社,2014:1232-1235.
- [3] 李学军,鲍战猛,高彩凤,等.北运河浮游动物调查及水

质评价[J].生态学杂志,2014,33(6):1559-1564.

- [4] 班胭胭,金 生,丁伟业.河道三维水流数学模型计算及应用[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):153-156.
- [5] 汪建武,贺 屹.RD 预报模型在渠井结合灌区地下水水位动态预测中的运用[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):77-79.
- [6] 陈佳媛,王志强,刁艳芳.水资源可持续利用状态模糊评价模型研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):110-112.
- [7] 徐 斌,杨悦锁,王 咏,等.生态修复工程条件下污染河流水质模拟和应用[J].应用生态学报,2017,28(8):2714-2722.
- [8] 王晓鹏.河流水质模拟预测的统计建模研究——以湟水河小峡桥断面为例[J].青海师范大学学报(自然科学版),2015,31(4):1-5.
- [9] 陈文君,段伟利,贺 斌,等.基于 WASP 模型的太湖流域上游茅山地区典型乡村流域水质模拟[J].湖泊科学,2017,29(4):836-847.
- [10] 杨澄宇,代 超,伊 璇,等.基于正交设计及 EFDC 模型的湖泊流域总量控制——以滇池流域为例[J].中国环境科学,2016,36(12):3696-3702.
- [11] 郑婷婷,徐明德,景胜元,等.汾河水库水动力及水质数值模拟[J].水利水运工程学报,2016(3):105-113.
- [12] 黄庆超,石巍方,刘广龙,等.基于 Delft3D 的三峡水库不同工况下香溪河水动力水质模拟[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):33-39.
- [13] 王兴伟,陈家军.地下水内排对南水北调中线干渠水质的影响[J].南水北调与水利科技,2015(5):1005-1009.
- [14] 周鹏程,王丽萍,赵璧奎,等.多水库水质模拟模型参数优化研究[J].水电能源科学,2012,30(3):48-50.
- [15] 吴俊锋,高 岩,谢 飞,等.基于二维水动力水质模拟下水环境容量的求解研究[J].环境科学与管理,2017,42(4):52-55.
- [16] 唐国平,陈德超,黄振旭,等.基于 WASP 模型的水质模拟及参数敏感性分析[J].水电能源科学,2017,35(5):41-44.
- [17] 刘梅冰,陈冬平,陈兴伟,等.山美水库流域水量水质模拟的 SWAT 与 CE-QUAL-W2 联合模型[J].应用生态学报,2013,24(12):3574-3580.