

生态调节坝对御临河水动力水质影响的模拟研究

李琨,徐强,陈俊宇,何强

(重庆大学 环境与生态学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要: 御临河生态调节坝在减少三峡库区调度产生的消落区面积的同时,也改变了御临河内的水动力特性和水环境质量,调节坝对御临河水动力水质影响的量化是一个值得研究的问题。基于 SWMM 和 EFDC 模型,构建了御临河流域的水文、水动力和水质模型,通过对建坝前后的模拟分析对比,探求了生态调节坝对御临河水动力水质的影响。结果表明:调节坝运行后,御临河流速会受到较大滞缓,且下游段(舒家至调节坝)受影响比上游段(梅溪至舒家)更大;由于流速滞缓作用,枯水期水体形成较明显的水质分段现象,但在丰水期该现象得到一定改善;建坝后水质指标浓度均有不同程度升高,下游流经建设用地段各水质指标浓度最高,库首段水质建坝前后变化幅度最大。模拟结果可以显示调节坝对御临河水动力和水质的影响,为三峡库区其他支流修建水利枢纽设施对其造成的影响评价提供一定参考。

关键词: 生态调节坝; EFDC 模型; SWMM 模型; 水动力水质数值模拟; 御临河

中图分类号:TV143; X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0015-09

Impacts of the eco-adjustment dam on the hydrodynamics and water quality of Yulin River based on simulations

LI Kun, XU Qiang, CHEN Junyu, HE Qiang

(Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region, Ministry of Education, College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to reduce the area of water-level fluctuation zone in Yulin River caused by the dispatch of Three Gorges Reservoir, an eco-adjustment dam has been constructed. However, this construction also changed the hydrodynamic characteristics of Yulin River, thereby changing the quality of the water environment. Quantifying the impact of this construction is worth studying. Based on SWMM (storm water management model) and EFDC (environmental fluid dynamics code) models, a coupling model system of hydrology, hydrodynamics and water quality of Yulin River Basin was built to investigate the influence of the eco-adjustment dam on the hydrodynamics and water quality of Yulin River. The simulation results with and without the dam show that after the operation of the dam, the flow velocity of Yulin River greatly decreased, and the drop in the downstream section (from Shujia to the dam) was greater than that in the upstream section (from Meixi to Shujia). Obvious water quality segmentation occurred during the dry season because of the velocity decrease, but the phenomenon was attenuated in wet season. All indexes of water quality increased after the dam was built with the highest concentration occurring in the section flowing through the construction land and the largest change appeared in the head section of the reservoir. The simulation results can demonstrate the impact of the dam on the hydrodynamics and water quality of Yulin River and this research can provide some reference for assessing the effect of similar construction projects on other tributaries of the Three Gorges Reservoir.

Key words: eco-adjustment dam; EFDC (environmental fluid dynamics code) model; SWMM (storm water management model); numerical simulation of hydrodynamics and water quality; Yulin River

收稿日期:2020-01-17; 修回日期:2020-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51779020),国家重点研发计划项目(2017YFC0404703)

作者简介:李琨(1994-),男,四川资阳人,硕士研究生,研究方向为水动力水质数值模拟。

通讯作者:何强(1965-),男,江苏江阴人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水体污染控制与修复技术。

1 研究背景

三峡工程是世界上规模最大的水利工程,在带来防洪、发电、航运等巨大效益的同时,三峡工程的运行也对库区支流的生态与环境产生一定的影响^[1]。其中,由于运行期间长江干流库区段的水位在 145 ~ 175 m 之间变化,会形成 30 m 垂直落差的消落带,上游、库周以及支流边排放的污染物滞留库岸,在消落带上形成污染带而对库岸环境造成影响^[2]。为了减少消落区面积,部分库区支流开始兴建生态调节坝来控制水位变幅,缓解消落区带来的不利影响^[3]。但是,人工截流筑坝等水利枢纽工程也将改变河流湖泊流域原有的水文特征、水环境流场以及原有的物质场和能量场^[4],对河流湖泊相关物质的迁移转换过程影响十分明显^[5-7]。

近年来,随着计算机技术和数值计算的快速发展,众多有影响力的水动力水质模型开始涌现,如 EFDC、Delft3D、MIKE、CE - QUAL - W2、WASP 等^[8-9],众多学者利用这些机理性模型工具,开展了水利枢纽与流域水环境影响关系的研究。戴凌全等^[10]利用耦合的一二维水动力模型,研究分析了三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果的影响。唐昌新等^[11]使用 EFDC 模型,分析了鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水龄变化的影响。王征等^[12]基于 EFDC 模型建立了三峡库区长寿到涪陵江段的三维水动力模型,探究支流河口水动力受大坝调度作用的响应机制。黄庆超等^[13]利用 Delft3D 模型建立了三峡库区支流香溪河的水动力水质模型,模拟了三峡水库不同工况下香溪河的水动力与水质变化情况。Ji 等^[14]应用 CE - QUAL - W2 模型研究了由三峡大坝回水造成的水位上升对支流香溪河藻华爆发防止作用的机理原因。

虽然三峡库区中水利枢纽对水动力水质影响关系的模拟研究受到广泛的关注,但研究者的关注点多集中于干流及库首支流,而对库尾支流关注度较低。而针对受到生态调节坝水位控制与三峡大坝联合调控的库尾支流水环境模拟更是鲜有研究。因此,本文以修建有生态调节坝的库尾支流——御临河为研究对象,利用 SWMM 和 EFDC 模型建立了御临河流域水文、水动力和水质模型,探究在三峡大坝调控水位变幅影响的背景下,修筑生态调节坝对御临河水动力和水质特征的影响,为丰富三峡库区水环境模拟以及其他库区支流拟建水利枢纽工程的评价工作提供参考。

2 御临河概况及水环境数学模型构建

2.1 研究区域概况

御临河(29°34'45" ~ 30°07'22"N, 106°27'30" ~ 106°57'58"E)为长江左岸一级支流,也是三峡库区重要的库尾一级支流,发源于四川省达州市大竹县周家镇青杠垭,在重庆市渝北区洛碛镇红岗村汇入长江。御临河全长 208.4 km,流域面积 3861 km²,重庆市境内流域面积 772.8 km²,多年平均径流量 16 × 10⁸ m³。在三峡大坝正常调度状态下,回水影响区为 39.1 km。本次研究区域为御临河生态调节坝至回水区末端梅溪段之间的区域,该段河道长度约 36.7 km,河面宽为 90 ~ 300 m,下游区域(坝前至舒家段)平均水深 18 m,上游区域(舒家至梅溪段)平均水深 8 m,集水区域面积为 218.08 km²。该研究区域周边土地利用类型多样,涉及部分乡镇,流经了正在开发建设的两江新区龙兴工业园区,也存在较多耕地和未经开发的山区林地。研究区域所在三峡库区的位置见图 1,研究区域土地利用类型和计算河段及其监测断面见图 2。

2.2 生态调节坝概况

御临河生态调节坝位于御临河下游段的洛碛镇郑家湾处,距离入江口约 2.7 km,通过修建混凝土重力坝的方式降低三峡库区调度水位变幅,从而减少消落带面积,改善流域生态环境。水库正常蓄水位 172.20 m,正常库容 1 082 × 10⁴ m³,总库容 2 844 × 10⁴ m³,坝长 164 m,最大坝高 25.20 m^[15]。在正常运行情况下,当三峡水库水位低于 172.20 m 时,按 172.20 m 运行;当三峡水库水位高于等于 172.20 m 时,与其水位同步。

2.3 研究区域污染负荷

2.3.1 点源负荷 经过课题组在 2018 年间多次对御临河流域进行污染源调查,总共发现 11 处入河排放口;另外,御临河干流复盛段处建有污水处理厂,该处理厂采用改良型 A²/O 工艺,尾水处理达一级 A 标准,处理规模为 4 × 10⁴ m³/d(排放口及污水厂位置见图 4)。经核算,COD、氮、磷的点源污染负荷分别为 1 138.8、266.0、8.8 t/a。

2.3.2 面源负荷 根据研究区 30 m 精度土地利用类型图(图 2(a))、30 m 精度数字高程图(图 3)和重庆市渝北区气象局的降雨、蒸发、气温、风速风向数据构建 SWMM 流域水文水质模型,利用 SWMM 模型计算御临河研究河段的面源污染负荷。在 Arc-GIS 系统中根据高程将研究区域划分为 22 个子流

域,并利用其水文分析工具生成流域支流,根据现场勘测情况,将主要入库支流概化为7条,支流河道采用一维明渠流模拟(图4)。

由于考虑 EFDC 的边界条件输入限制,子流域 21、20、18 等主河道经过的区域均作为点源输入到水动力水质模型中。

2.4 水动力水质模型构建

2.4.1 网格划分 由于计算河道段长度较长,为了提高模拟精度,将计算河段分为两段:梅溪至舒家为上游计算段,舒家至坝前为下游计算段(图2(b))。采用 Delft3D 软件将模型区域上游段划分为 3 370 个水平网格,下游段划分为 3 720 个水平网格,网格平均间距为 20 m,在垂向上采用 σ 坐标,平均分为 3 层,用河底和水体表层之间的厚度来定义垂向网格的高度,各层高度所占厚度比例为 0.33。

2.4.2 初始条件 水下地形是 EFDC 水动力模拟的基础数据,本次模拟应用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)对计算河段设置的 45 个断面测量河底地形,并采用克里金插值法将整个河段地形数据插值输入至 EFDC 模型中。上游段初始水位设置为模型模拟时段第 1 天梅溪和舒家断面所测水位插值生成的直线,水温设置为 11.21℃,水质初始值设置为 2018 年 1 月梅溪断面实测值。下游初始水位设置为舒家断面和坝前断面所测水位插值生成直线,水温设置为 11.32℃,水质设置为 2018 年 1 月舒家断面实测值。

2.4.3 边界条件 分别设置梅溪断面和舒家断面监测的月流量及水质数据作为上游段和下游段的上

边界,舒家断面和坝前监测的月水位数据作为上游段和下游段的下边界,由污染源调查所得的排口数据及 SWMM 计算所得支流和子流域流量及水质也作为边界条件输入。同时输入包括气压、气温、相对湿度、降雨量、风向、风速、云量、辐射等逐日数据作为气象边界条件。边界条件输入情况见图 5。

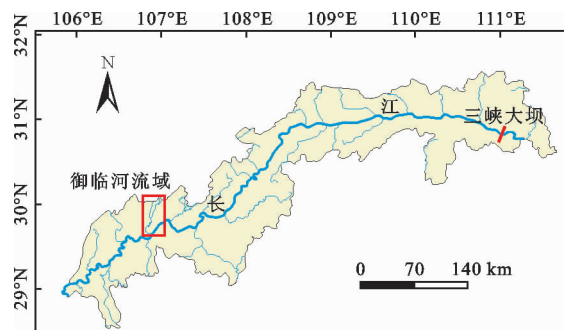


图1 研究区域所在三峡库区的位置

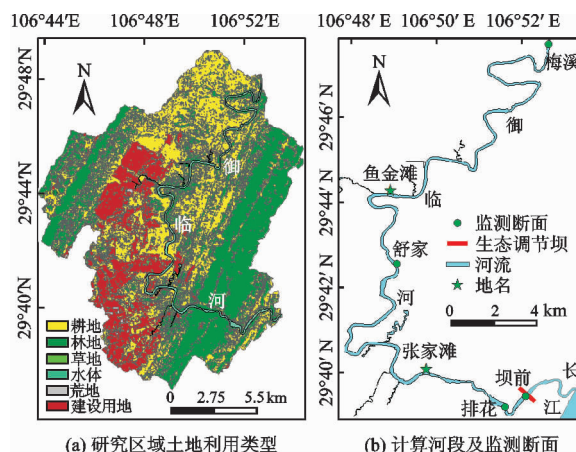


图2 研究区域土地利用类型和计算河段及其监测断面

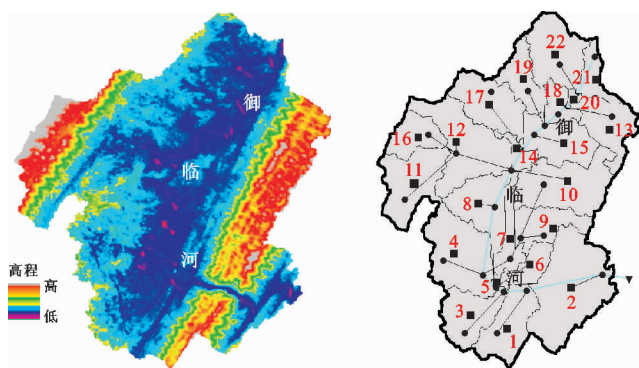


图3 研究区域数字高程

图4 SWMM 模型子流域划分及河道概化

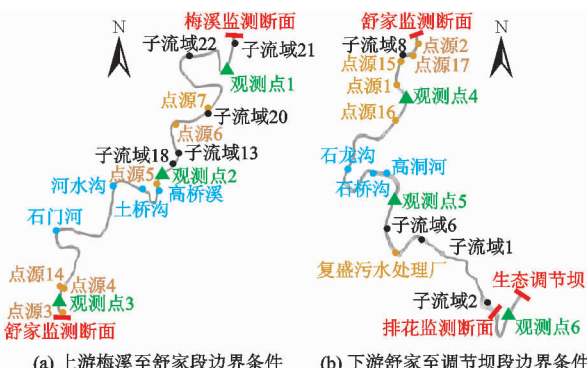


图5 EFDC 水动力学模型边界条件

2.4.4 模型验证 根据搭建好的流域模型和水体水动力水质模型,以 2018 年 1 月为模型运行开始时间、2018 年 12 月为模型运行结束时间进行为期 1 a 的模拟,SWMM 模型的 reporting step、dry step、wet step 分别取 10 min、1 d、10 min,EFDC 计算采用动态

时间步长,最小步长为 0.5 s,安全因子取 0.2。以上游段末端舒家、下游段近末端排花监测断面 2018 年的最大水深、平均流速、平均水温实测资料作为水动力运算结果的对照,以舒家、排花监测断面 2018 年的 COD_{Mn} 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 共 4 个水质因子实测

资料作为水质运算结果的对照,对上游段和下游段模型参数进行反复率定计算,最终确定的验证结果见图 6、7。

由图 6、7 可以看出,在水动力方面,两个断面的最大水深与水温模拟效果较好,舒家断面水深与水温的全年平均相对误差分别为 0.86%,6.92%;而排花断面则为 1.23%,4.18%。舒家断面的流速误差在 20% 以内而排花流速误差稍大,为 24.18%;造成流速误差较大的原因有两个,其一是实测流速较低,均为 0.2 m/s 以下,而断面监测流速使用的仪器是多普勒剖面流速仪,其流速测量在低流速时存在较大误差,因此也说明了排花断面因为流速更小,而模拟的误差更大。其二是由于部分断面网格分辨率不够高,被判定为干网格不参与计算的网格面积比实际河流中的漫滩面积大,从而造成较大的误差。但模拟趋势都与实测趋势一致,建立的水动力模型可以用来模拟预测御临河的水动力状况。

而在水质方面,御临河上游段和下游段的监测指标在 2018 年内均为先上升后下降的趋势,在 6 -

8 月达到峰值。舒家断面 COD、总氮、氨氮、总磷的平均相对误差分别为 15.87%、7.73%、10.72% 和 12.95%;排花断面则为 14.63%、14.54%、16.84% 和 14.15%。整体而言,下游段水质模拟结果较上游段差,这与下游流速模拟结果偏差较大具有一定的联系。虽然水质误差较水动力误差大,但仍保持了趋势一致,能够反映出御临河实际水体中水质变化的趋势,因此,水质模型可以用来模拟预测御临河的水质状况。

2.4.5 模拟方案 依据 2009 - 2018 年的重庆市水资源公报,2015 年降水量比多年平均降水量少 19.65%,属于偏枯年份,以此年份作为本次模拟的典型年,进行最不利条件下御临河建坝与未建坝两种情景的水动力与水质模拟。

比较在三峡大坝调度运行下,生态调节坝对御临河的生态环境影响。其中,EFDC 支流流量及面源污染负荷根据 SWMM 模型以 2015 年气候数据计算得到,排口流量和点源污染负荷则以 2018 年所测数据保持不变。

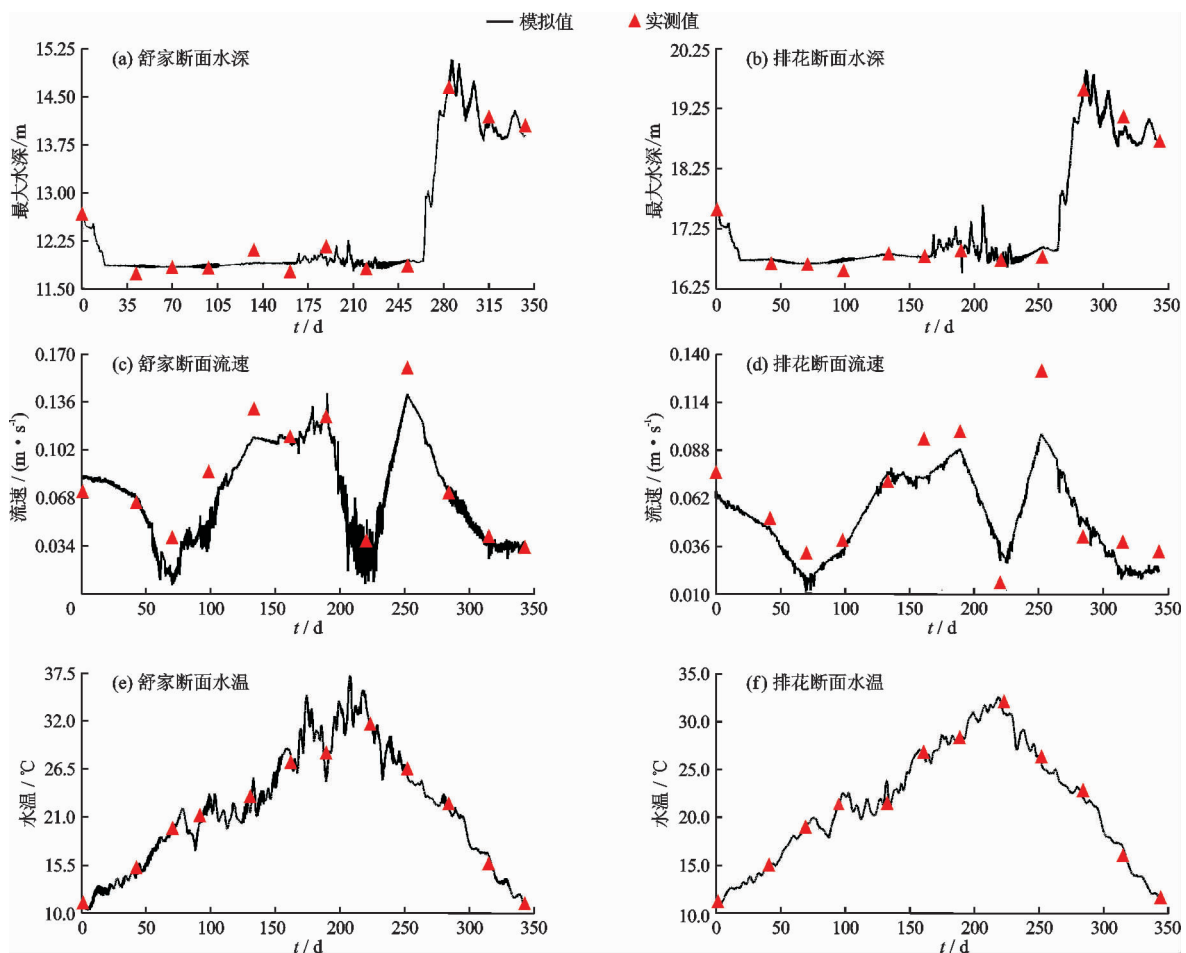


图 6 2018 年御临河舒家和排花断面水动力模拟值与实测值比较

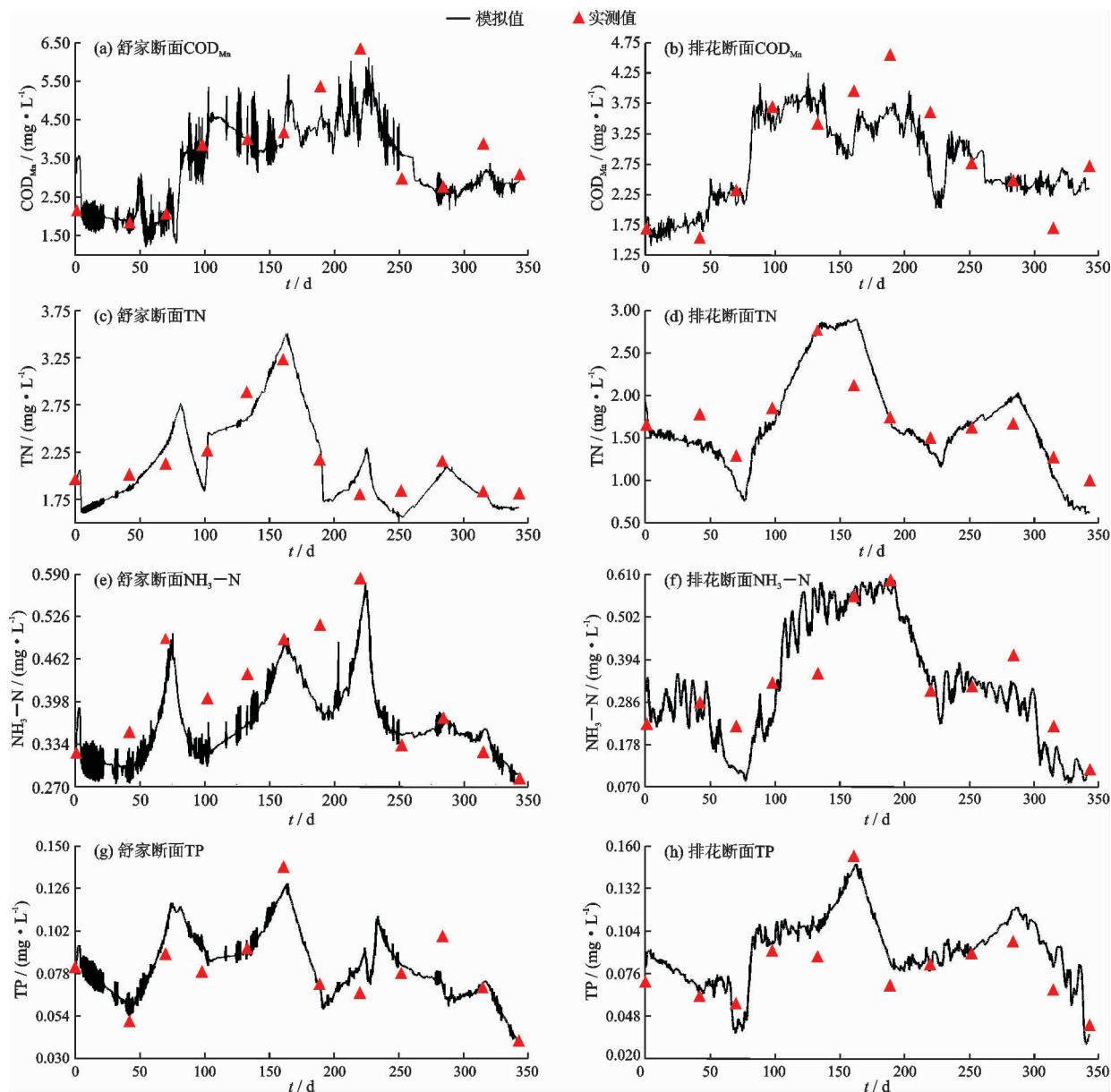


图7 2018年御临河舒家和排花断面4个水质因子浓度模拟值与实测值比较

3 结果与分析

3.1 水动力模型模拟结果与分析

为了对比分析生态调节坝对御临河水动力条件的影响,分别在计算区域上游段(梅溪至舒家)和下游段(舒家至调节坝)的段首、段中以及段尾共设置了6个观测点(观测点分布见图5)。将典型年2015年的1-3月和12月划分为枯水期,6-9月划分为丰水期^[16-18]。

2015年上下游段有、无调节坝流速全年、丰水期、枯水期的最大值、最小值和平均值计算结果见图8。图8表明,御临河生态调节坝对上下游段的流速均造成了影响。其中,上游段年平均流速、丰水期平

均流速、枯水期平均流速分别由建坝前的0.184、0.282和0.095 m/s减小为建坝后的0.137、0.142和0.081 m/s,分别降低了25.62%、49.23%和14.40%。丰水期流速变化最大,这主要是因为生态调节坝在三峡水库放水期抬高了水位,造成了过流断面增大,流速减小。生态调节坝对御临河下游段的流速影响较上游段更为明显,造成的流速变化幅度均在35%以上,其中年平均流速由0.119 m/s降为0.065 m/s,丰水期流速从0.090 m/s减少到0.040 m/s,而枯水期流速则由0.072 m/s降到0.044 m/s,下降幅度分别为45.31%、52.05%和39.20%。由于调节坝在丰水期的水位调节作用,丰水期流速变化幅度同样最大。

总之,调节坝的调节过程减缓了上游段和下游段的水体流动,年平均流速、丰水期枯水期流速以及最大、最小流速都受到了不同程度的影响。

为了分析调节坝对御临河近坝段的流场影响,选择了水动力条件反差最大的无调节坝最低水位时期(2015年5月11日)与同期有调节坝的流场进行比较,其结果见图9。分析图9可知,上游段受影响较小,除部分河湾处在建坝后形成局部小范围回

流外,其余流场格局基本相似。下游段在靠近坝址前3.1 km段由于最小水位172.2 m的顶托作用,产生的回水与上游来水反向相遇,造成平行力矩效应,从而形成较大面积的环流,而在固边界和河湾处会出现杂乱的流场分布,在近坝端由于调节坝溢流流的运行,河流流速变大。而在有较大来流的支流附近区域,流场格局无较大变化,说明调节坝对有支流来水区域的流场无明显影响。

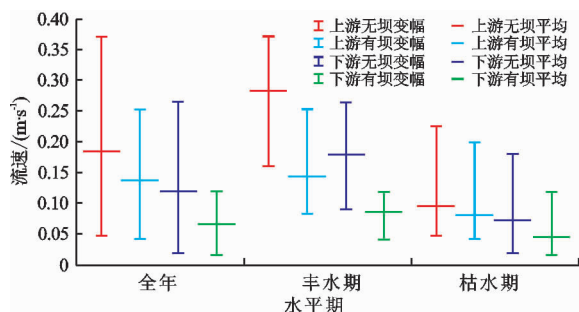


图8 2015年上下游段有无调节坝流速全年、丰水期、枯水期的最大值、最小值和平均值

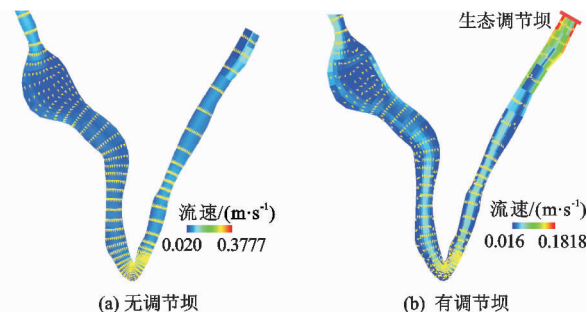


图9 2015年无调节坝最低水位近坝段流场与同期有调节坝的流场对比

3.2 水质模型模拟结果与分析

3.2.1 水质分布特征 御临河计算流域涵盖了多种用地类型,从上游梅溪段以耕地为主的土地利用区域再到舒家段大面积的城市建设用地,最后在下游流经了无人开发的林地和草地(图2(a))。而土地利用类型的结构组成和空间分布特征对水体水质会产生不同的影响^[19]。由EFDC模型计算得出2015年建坝后1-12月水质分布结果得知,全年御临河水质分布与流域用地类型具有明显的响应关系,上游梅溪至鱼金滩段流域大部分以耕地和草地为主,月平均水质达Ⅱ类水体的月份占83.3%;而鱼金滩至张家湾段由于流经大片城市建设用地,达到Ⅱ类水体的月份只占到58.3%;最后由张家湾至调节坝段所属流域覆盖大片林地,水体水质又有所好转,达Ⅱ类水体月份占到了75%。

在模拟的1-3月份和12月份为御临河的枯水期,其上下游流速十分缓慢,均小于0.1 m/s,流态接近于湖泊型水体^[20],因此对流扩散作用较弱,由点源负荷形成的污染带较长,此时期由于降雨较少,面源负荷低。计算区域水体流经的耕地段、城市建设段和林地分段明显,其中城市建设段各水质指标浓度最大。同时由于三峡大坝调度的影响,河口水位高于172.2 m,御临河不受生态调节坝的调控,与库区联通,因此在库首没有存在污染物累积的现象。此时期4个水质因子浓度分布见图10。

平水期研究区上下游水质分布大致与枯水期相当,污染带面积有所减小。

图11为2015年丰水期研究区上下游段4个水质因子浓度分布。图11中水质因子浓度与枯水期(图10)相比,其梯度变化小于枯水期,说明在丰水期由于流速的增加和对流扩散作用的增强,上下游水质分布变得较为均匀,浓度范围差别比枯水期减小,但由于降雨的增加,面源污染输入至水体中,水质平均浓度要大于枯水期。同时,在丰水期由外界污染源造成的污染带也由于流速的增加而被很快的稀释,相比于枯水期和平水期,其面积大大减小。而在库首由于调节坝的挡水作用,存在不同程度的污染物累积,造成了库首水质浓度偏高的现象,这也是图11中库首区域颜色较附近区域发生突变的原因。

3.2.2 调节坝对水质的影响 考虑到不同段落流经的土地类型利用特征,因此选择了观测点2(耕地为主)、观测点4(建设用地为主)和观测点6(林地为主)作为水质结果的代表点位,同时这3个观测点位也代表了计算区域的上部、中部和下部,以此来研究调节坝对水质的影响情况。调节坝运行前后御临河水质因子浓度变化特征见表1。

由表1可看出,调节坝运行后,3个代表性观测点处的 COD_{Mn} 、 TN 、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 、 TP 浓度均呈现上升趋势。对表1中数据分析总结如下:

(1) 枯水期时,各个点位的上升幅度相对较小,

各指标浓度比调节坝运行前增大不到 10%,观测点 2、4、6 的 COD_{Mn} 浓度分别比调节坝运行前增大了 4.50%、5.14% 和 9.70%,分别达到了 1.83、2.75 和 2.39 mg/L ;TN 浓度分别增大了 2.35%、4.64% 和 7.76%; $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别增大了 2.17%、9.36% 和

9.75%;TP 浓度 3 个点位的变化幅度相近,分别为 8.60%、8.40% 和 7.67%,达到了 0.059、0.066 和 0.056 mg/L 。枯水期御临河与三峡库区联通,调节坝调控作用较小,因此调节坝运行前与运行后的水质变化幅度较小。

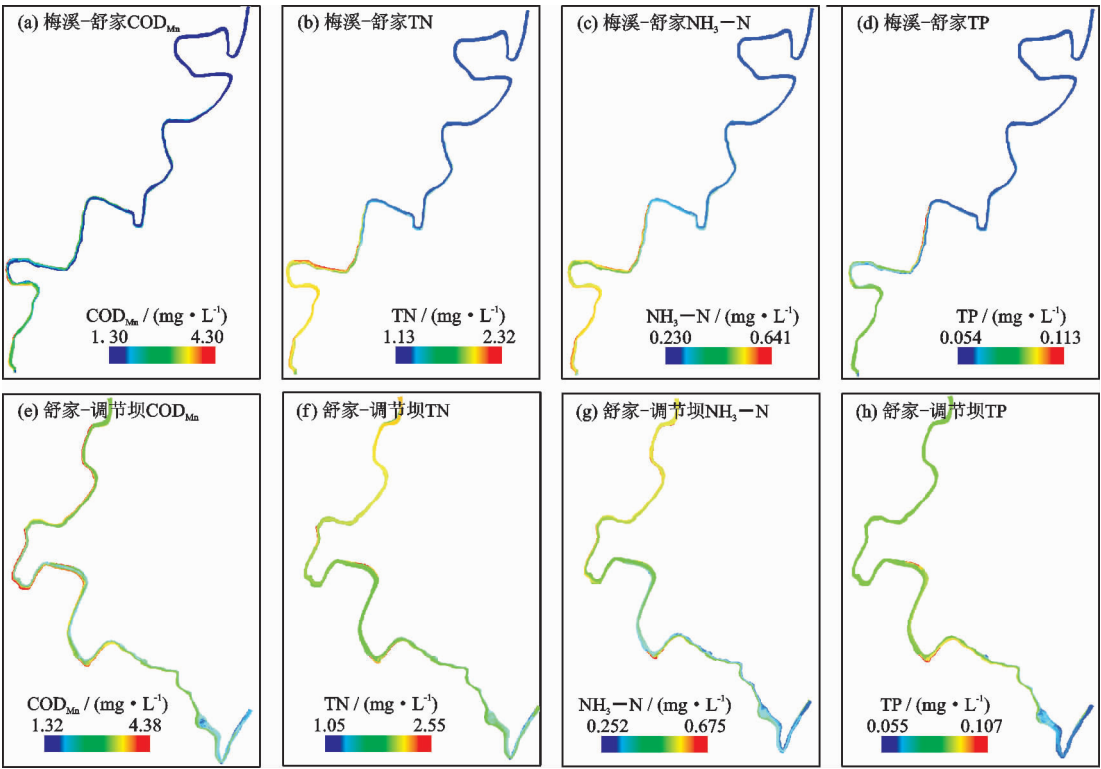


图 10 2015 年枯水期研究区上下游段 4 个水质因子浓度分布图

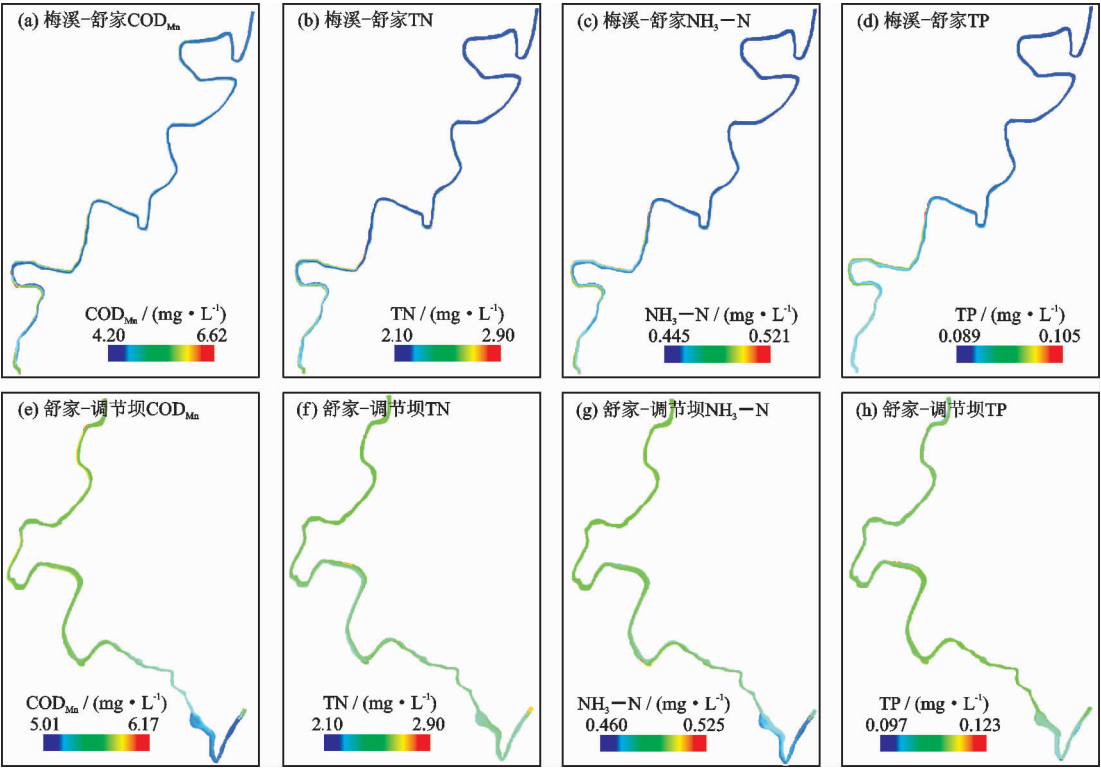


图 11 2015 年丰水期研究区上下游段 4 个水质因子浓度分布图

表 1 调节坝运行前后不同水平期研究区代表性观测点各水质因子浓度特征

mg/L, %

水平期	观测位置	运行期及比较	各水质因子浓度均值			
			COD _{Mn}	TN	NH ₃ —N	TP
枯水期	观测点 2	调节坝运行前	1.75	1.75	0.250	0.054
		调节坝运行后	1.83	1.79	0.256	0.059
		变化幅度	4.50	2.35	2.17	8.60
	观测点 4	调节坝运行前	2.62	1.74	0.331	0.061
		调节坝运行后	2.75	1.82	0.362	0.066
		变化幅度	5.14	4.64	9.36	8.40
	观测点 6	调节坝运行前	2.17	1.21	0.225	0.052
		调节坝运行后	2.39	1.31	0.246	0.056
		变化幅度	9.70	7.76	9.75	7.67
平水期	观测点 2	调节坝运行前	2.58	1.70	0.343	0.061
		调节坝运行后	2.75	1.89	0.361	0.067
		变化幅度	6.53	11.29	5.24	9.35
	观测点 4	调节坝运行前	3.94	1.99	0.377	0.090
		调节坝运行后	4.08	2.22	0.456	0.095
		变化幅度	3.65	12.04	20.93	6.69
	观测点 6	调节坝运行前	2.82	1.58	0.268	0.083
		调节坝运行后	3.42	1.80	0.335	0.092
		变化幅度	21.47	14.32	25.02	10.60
丰水期	观测点 2	调节坝运行前	3.79	1.90	0.421	0.077
		调节坝运行后	4.29	2.12	0.450	0.090
		变化幅度	13.20	11.85	6.99	16.75
	观测点 4	调节坝运行前	5.00	2.12	0.428	0.102
		调节坝运行后	5.51	2.49	0.514	0.113
		变化幅度	10.16	17.41	20.15	11.30
	观测点 6	调节坝运行前	3.76	1.88	0.366	0.083
		调节坝运行后	5.31	2.36	0.462	0.103
		变化幅度	41.20	25.35	26.30	23.18

(2) 平水期时, COD_{Mn} 指标中观测点 6 的变化幅度最大, 增加到了 21.47%, 由调节坝运行前的 2.82 mg/L 增大到运行后的 3.42 mg/L, 观测点 2 和 4 变化幅度较枯水期相近。3 个点位的 TN 浓度在调节坝运行后均增大了 10% ~ 15% 左右, 分别由 1.70 mg/L 增大至 1.89 mg/L、由 1.99 mg/L 增大至 2.22 mg/L、由 1.58 mg/L 增大至 1.80 mg/L。观测点 2 在平水期的 NH₃—N 浓度变化较小, 为 5.24%。而观测点 4 与观测点 6 变化较大, 达到了 20% 以上, 分别为 20.93% 和 25.02%。3 个点位平水期 TP 浓度变化幅度较小, 分别为 9.35%、6.69% 和 10.60%。平水期处于枯水期与丰水期的过渡状态, 此时御临河受到三峡水库和生态调节坝的交替调节, 与修建调节坝前相比, 流速差异变化较大, 因此各个指标的变化幅度存在较大的差异, 但相比于枯水期, 变化幅度大部分都在增大, 说明调节坝对御临河水质影响显著。

(3) 丰水期时, 各个指标的变化幅度达到了最大。3 个代表点位 COD_{Mn} 浓度分别由调节坝运行前的 3.79、5.00、3.76 mg/L 增大至运行后的 4.29、5.51 和 5.31 mg/L, 分别增加了 13.20%、10.16% 和 41.20%; TN 浓度分别增大至 2.12、2.49 和 2.36 mg/L, 分别增加了 11.85%、17.41% 和 25.35%; NH₃—N 浓度分别由运行前的 0.421、0.428、0.366 mg/L 增大至运行后的 0.450、0.514 和 0.462 mg/L, 分别增大了 6.99%、20.15% 和 26.30%; TP 浓度分别由运行前的 0.077、0.102、0.083 mg/L 升高至 0.090、0.113 和 0.103 mg/L, 变化幅度分别为 16.75%、11.30% 和 23.18%。由于丰水期调节坝最低调节水位为 172.2 m, 相比建坝前 165 m 的平均水位, 形成了约 7 m 的水位差别, 由此造成的水动力条件差异较大, 调节坝建成后由于流速减缓, 物质扩散作用减弱, 容易造成污染物的滞留, 而使水质指标升高。

4 结 论

本文利用 SWMM 和 EFDC 模型,构建了三峡库区库尾支流—御临河流域水文水动力和水质模型,利用水深、流速、水温、水质等实测资料对模型进行了校核,使所建模型能够较好地反映御临河水动力和水质特征。针对御临河所建生态调节坝,通过对之为期一年的情景模拟,探求了调节坝对御临河枯水期和丰水期水动力和水质的可能影响,得到以下结论:

(1)生态调节坝的运行对御临河水动力条件具有较大影响。流场方面,由于大坝挡水作用所产生的回水与来水反向相遇,产生力矩效应,会在坝前 3.1 km 处形成较大面积环流;流速方面,下游段(舒家至调节坝)较筑坝前变化幅度大于上游段(梅溪至舒家),其年平均流速、枯水期和丰水期流速均降低了 35% 以上,丰水期受影响最大,达到了 52%,流态趋近于湖泊型水体,上游段变幅则在 14% ~ 49% 之间,丰水期受影响同样最大。

(2)御临河水动力条件的变化进而导致水质状况发生变化。由于筑坝造成的流速放缓,在枯水期对应流经不同用地类型子流域的河段会产生较为明显的水质分段现象,而在丰水期由于流速的增大,分段现象得到一定改善,但由于大坝阻挡,坝前会产生一定程度的污染物累积,水质浓度较临近段升高。全计算河段各水质指标浓度均呈现一定的升高趋势,且与流速变化趋势一致,丰水期变幅达到最大,其中位于坝前的观测点 6 处变化幅度最大, COD_{Mn} 、 TN 、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 、 TP 4 个水质因子浓度较筑坝前分别增大了 41.20%、25.35%、26.30% 和 23.18%。

(3)根据本文研究结果,丰水期御临河的水动力、水质条件受调节坝影响最大,而由于该时期气温全年最高、光照充足,需要注意水体富营养化情况的出现。合理动态调度生态调节坝水位,改变水动力条件,同时从源头进行水环境治理,减少御临河的污染负荷,是应对该问题的有效措施。

(4)基于本文研究成果,可进一步探究多种优化算法下的生态调节坝动态调度对河流水动力条件和水质分布的改善效果,从而根据不同条件筛选出最优调度方案,供相关决策部门参考。

参考文献:

- [1] 钟成华. 三峡水库对重庆段水环境影响及其对策[M]. 重庆:西南师范大学出版社,2004.
- [2] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J].

长江科学院院报,2004,21(2):32-34+41.

- [3] 林建,蒋华林,雷亨顺. 水库小流域环境治理的探索与实践——开县三峡库区消落带环境治理调研[J]. 重庆三峡学院学报,2007,23(5):6-9.
- [4] 王耀耀,吕林鹏,纪道斌,等. 向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应[J]. 环境科学,2019,40(8):3530-3538.
- [5] KELLY V J. Influence of reservoirs on solute transport: A regional-scale approach [J]. Hydrological Processes, 2001,15(7):1227-1249.
- [6] HUMBORG C, ITTEKKOT V, COCIASU A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. Nature, 1997,386:385-388.
- [7] YU Zhigang, MI Tiezhu, YAO Qingzhen, et al. Nutrients concentration and changes in decade-scale in the central Bohai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001,20(1):65-75.
- [8] 李金. 水质模型发展概述[J]. 环境科学与管理,2012,37(S1):57-60.
- [9] 王海涛,金星. 水质模型的分类及研究进展[J]. 水产学杂志,2019,32(3):48-52.
- [10] 戴凌全,蔡卓森,刘海波,等. 三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):170-175.
- [11] 唐昌新,张晓航,郭年华,等. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对水龄的影响模拟分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):195-206.
- [12] 王征,郭秀锐,程水源,等. 三峡库区支流河口水动力及水污染迁移特性[J]. 北京工业大学学报,2012,38(11):1731-1737.
- [13] 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.
- [14] JI Daobin, WELLS S A, YANG Zhengjian, et al. Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China [J]. Ecological Engineering, 2017,98:70-81.
- [15] 朱元春. 御临河生态调节坝岩质边坡稳定性评价[J]. 河南水利与南水北调,2017(2):8-9.
- [16] 刘辉,卓海华,陈水松. 三峡水库试验性蓄水期间水环境质量监测分析[J]. 人民长江,2012,43(1):55-58.
- [17] 曾凡海,张晟,熊强,等. 三峡水库干流氮和磷含量的季节变化[J]. 中国环境监测,2012,28(5):29-32.
- [18] 郭胜,李崇明,郭劲松,等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学,2011,32(5):1266-1272.
- [19] 吕志强,庆旭瑶,任玉芬,等. 山地城市河流土地利用结构对水质的影响——以重庆市为例[J]. 湖泊科学,2016,28(2):319-327.
- [20] 焦军丽,马巍,裴倩楠,等. 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,6(6):544-548.