

水质模型中污染物衰减系数敏感性分析

史常乐, 牛兰花, 成金海

(长江水利委员会水文局 长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 对于河流纳污能力数值模拟问题, 污染物扩散衰减系数是一个重要参数, 决定了模型的准确性和可靠性。本文针对三峡大坝至葛洲坝之间河段, 基于 Mike21 建立平面二维水质模型, 以氨氮为典型污染物分析河流纳污能力, 在此基础上进行了衰减系数对流量、本底浓度及有无衰减过程等因素的敏感性分析。模拟结果表明: 相比本底浓度, 流量的改变对污染物扩散过程的影响更为明显; 污染物扩散范围随流量的增加而增加, 随本底浓度的增大而降低; 增大衰减系数将使污染物扩散范围减小, 且高流量低本底浓度时衰减系数的取值范围较大, 使得影响范围变幅最大。

关键词: 水质评价; 水质模型; Mike21; 纳污能力; 污染物; 污染物衰减系数; 敏感性分析

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0091-06

Sensitivity analysis of pollutant decay coefficient in water quality model

SHI Changle, NIU Lanhua, CHENG Jinhai

(Hydrology and Water Resources Survey Branch for Three Gorges Project, Hydrology Bureau of Changjiang River
Water Resources Commission, Yichang 443000, China)

Abstract: Decay factor is very important for numerical simulation of the assimilative capacity for a river, because it determines the accuracy and reliability of the water quality model. Based on Mike21, a two-dimensional water quality model was established to analyze the assimilative capacity of the typical river breach between the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam. Ammonia nitrogen was chosen as the typical pollutant. Sensitivity analysis was performed by changing the discharge, background concentration of the pollutant and decay factor. The simulation results show that: Compared with the background concentration, the change of discharge has a more obvious effect on the pollutant diffusion process. The diffusion range of pollutant increased with the increase of discharge and decreased with the increase of background concentration of the pollutant. Increasing the decay coefficient will reduce the range of pollutant diffusion, and the range of decay coefficient will be larger when the discharge is high and the background concentration of the pollutant is low, which makes the range of influence maximum.

Key words: water quality evaluation; water quality model; Mike21; assimilative capacity; decay coefficient of pollutant; sensitivity analysis

1 研究背景

随着社会经济的快速发展及河流开发程度的不断加大, 各类废水的入排量不断增加, 使河流的环境和生态功能受到严峻挑战。为实现河流的可持续开发, 确定河流的纳污能力已成为河流生态健康的一种重要评判手段。

对于河流中污染物的降解规律, 国外学者开展研究较早^[1-5]。在我国, 随着近些年社会对环境和

生态问题的关注, 政府部门对入河排污口的管理日趋规范^[6], 许多学者也对各类水质模型进行了研究和完善。研究的一般思路是: 根据污染物的对流扩散方程, 基于水动力模型, 建立耦合的水质模型, 通过设定不同的污染物扩散系数及衰减系数, 模拟不同水动力条件下污染物的迁移扩散规律, 从而对河流纳污能力做出评判。冯帅等^[7-8]通过设立采样点开展原位试验, 分析不同污染物的表观降解系数及生物降解系数的规律; 张亚丽等^[9]建立一维稳态模

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2018-04-03

作者简介: 史常乐(1989-), 女, 河南新乡人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为河道治理及工程泥沙研究。

型研究污染物在枯水期、平水期、丰水期的综合降解系数变化规律;张文志^[10]通过对污染源进行概化,基于上游本底浓度、设计流量、流速及综合衰减系数等参数建立了一维水质模型,并分析了各参数对河段纳污能力的影响;彭振华等^[11]探讨了河流流速和综合衰减系数的取值范围,及其对纳污能力计算的影响。黄苗等^[12]通过水槽试验、基于 EFDC 的纳污能力计算模型与现场投放示踪剂的方法结合,分析了粒径、含沙量、流速、光照对污染物降解过程的影响,认为衰减系数与粒径、含沙量、流速密切相关,为相关研究提供了宝贵的实测数据。

以往研究多选用一维水质模型计算河流纳污能力,对二维水质模型中主要参数的率定研究较少。本文选取长江三峡大坝至葛洲坝这一典型河段作为研究对象,采用 Mike21FM 耦合对流扩散方程,对河段左岸乐天溪排污口的污染物扩散规律进行模拟,并进行衰减系数对主要参数的敏感性分析。考虑到河流中氨氮含量相对较小,对衰减系数较敏感,故本文选取特征污染物氨氮作为水质指标进而评价衰减系数的敏感性研究。

2 数据与方法

2.1 研究区域概况

三峡大坝至葛洲坝之间干流长约 38 km^[13] (以下简称两坝间),自 2008 年汛末试验性蓄水后,两坝间水流条件受三峡大坝及葛洲坝蓄水影响,水流条件及污染物运行规律发生了巨大变化。葛洲坝水库具有径流式水库特性,即汛期是河道、枯季是水库,且受两坝联合调度运行呈现出水体变化的复杂性。因此,科学地了解两坝间河段内污染物的迁移降解规律,为进一步了解两坝间污染物特性变化规律提供依据,对两坝间水环境治理、水资源保护具有指导意义。

此次模型计算范围选取两坝间的部分干流河段,计算长度约为 13.9 km。模型上边界为乐天溪污水处理厂排污口上游约 3.7 km 处,下边界为乐天溪污水处理厂排污口下游约 10.2 km 处。首先建立两坝间一维河网水动力数学模型,为二维水质模型提供水动力边界,基于 Mike21FM^[14] 水动力模块耦合对流扩散模块进行计算,根据同步实测水文、水质资料,对水质模型进行率定和验证。

2.2 数学模型的建立

由于不同河段的水动力条件不同,污染物在水流中的对流、扩散衰减分布规律和河段纳污承载能

力差异很大。设定紊动扩散系数反映不同水动力条件下污染物的扩散现象,对于有降解过程的污染物来说,在输移扩散过程中通过物理、化学、生物等作用发生浓度衰减,其衰减系数反映了污染物在水体作用下降解速度的快慢。描述河道污染物对流扩散降解的浓度变化规律的二维方程形式为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(hu\bar{C})}{\partial x} + \frac{\partial(hv\bar{C})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(hE_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hE_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) - hKC + q_0C_0 \quad (1)$$

式中: C 为水中污染物的浓度, mg/L; E_x 为纵向紊动扩散系数, m^2/s ; E_y 为横向紊动扩散系数, m^2/s ; K 为衰减系数, d^{-1} ; q_0 为源汇处单位面积上的流量, m/s ; C_0 为初始断面的污染物浓度, mg/L。

通过设定一个恒定的衰减系数模拟污染物的降解过程,降解过程必须满足一级反应方程式:

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (2)$$

假定研究水体中的紊动扩散系统相同的情况下,对污染物本身的衰减系数来分析不同因素变化对模型水质结果的影响。计算网格为非结构三角形网格,为了同时满足计算精度和计算效率的双重目标,采用局部网格加密的网格设计方法,加密区域三角形网格控制水流向。垂直水流向网格间距 10 m,远离入河排污口的水域,网格相对疏一些,网格间距为 30 m。模型区域内的网格节点数为 23147 个,网格单元数为 45124 个,本文中高程系统如无特别说明,均为 1985 国家高程基准(模型计算网格及河势图见图 1)。

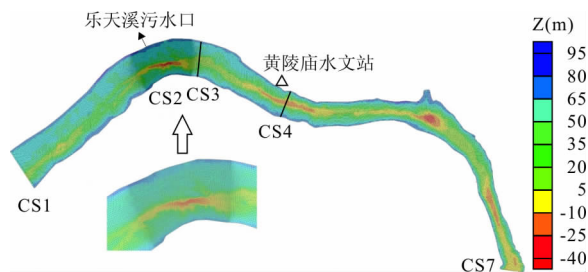


图1 模型计算网格及河势图

2.3 敏感性分析的方法

江河自身对污染物都有一定的自然净化能力,即污染物在水环境中通过物理降解、化学降解和生物降解后,浓度会有所降低。反映江河自然净化能力的指标称为降解系数,不同的水力条件、不同的污染物有不同的降解系数。由于不同河段水动力条件不同,河段纳污能力、污染物的扩散分布情况差异很

大,本文结合经验确定水流中紊动扩散系数为 $1\text{ m}^2/\text{s}$ 的前提下,研究流量、衰减系数、本底浓度的因素变化对模型区域水质预测结果的影响。在考虑紊动扩散系数相同的前提下,考虑流量、本底浓度、有无衰减过程三个自变量因素对污染物影响范围进行敏感性分析。

(1)流量边界条件:目前国内外普遍采用枯水期 90% 保证率最枯月月平均流量作为设计水文条件^[15]。采用自 2009 年三峡水利枢纽工程试验性蓄水 175 m 至今,选取黄陵庙水文站的最枯月平均流量,采用 P-Ⅲ 频率曲线法计算得出 90% 频率下的流量为 $5\,085\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2)水位边界条件:因计算河段处于两坝间,受三峡大坝及葛洲坝调度运行影响,两坝间水位流量关系不是单一的水位流量关系,因此选用一维河网水动力模型计算出两坝间沿程水面线,为二维模型提供边界条件。

(3)本底浓度选取:依据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),水体中污染物种类繁多且基本项目有 24 项,通常用高锰酸钾指数和氨氮作为双因子指标来评价河流的水质状况,本文选取氨氮作为葛洲坝水库污染物指标,研究对影响污染物衰减系数敏感性的因素进行分析。通过选取黄陵庙、南津关两个水质控制断面,作为两坝间水质的控制断面,其中黄陵庙水质控制断面在黄陵庙水文站断面附近,南津关水质控制断面在葛洲坝坝前约 3.3 km。

结合 2017 年 8 月 1 日由长江水利委员会水文局长江三峡水环境监测中心实测的研究区域内的氨氮为 0.157 mg/L 。为偏于安全考虑,选取最不利工况原则,确定背景浓度值选为氨氮为 0.157 mg/L 。因为枯水期是对水质最不利时期,故统计 2012-2016 年枯水期(每年 1-3 月、10-12 月)的每月水质统计资料,绘制图 2,并统计枯水期时的最大、平均、最小浓度见表 1,根据图 2 可知,两个断面氨氮变化同频发生,选取 2012-2016 枯水期(每年 10-次年 3 月)统计两个断面的氨氮平均值为 0.096 mg/L 。

3 结果与分析

3.1 参数率定

本模型计算参数有河道糙率系数 n 、扩散系数、污染物的降解系数 K 。模型参数率定与验证工作是模型可用性的最基本和重要的工作。天然河道的糙率受河床组成、河床形状、河滩覆盖情况、长江流量及含沙量等多种因素的影响。本模型在长江两坝间

河段进行了多次应用研究^[16],所率定的参数能够反映长江江段和水体的状态特征。本次模型参数采用以两坝间江段的模型值,水动力及水质耦合模型中各参数率定取值见表 2。

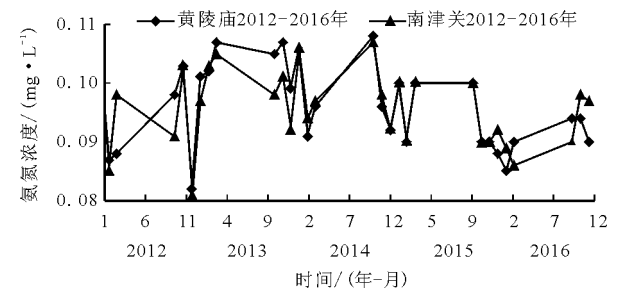


图 2 黄陵庙、南津关水质控制断面
枯水期氨氮浓度分月统计值

表 1 2012-2016 年黄陵庙、南津关枯水期氨氮值
mg/L

测站	最大值	平均值	最小值
黄陵庙	0.108	0.096	0.082
南津关	0.107	0.096	0.080

表 2 水动力水质模型参数率定值

河道糙率	紊动扩散系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	衰减系数/ d^{-1}
0.036~0.05	1	0.01

3.2 模型验证

模型上边界为进口断面流量,下边界为出口断面水位,采用恒定流进行计算。所需的资料包括:2016 年 1:2000 实测地形、排污口排放量 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 、出水水质执行一级 A 标准^[17],其中氨氮控制浓度为 5 mg/L ,并结合 2017 年 7 月 28 日实测数据为上游流量 $17\,500\text{ m}^3/\text{s}$,下游模型边界水位为 64.4 m。采用 2017 年 8 月 1 日由长江水利委员会水文局长江三峡水环境监测中心实测的同步水质观测资料,对本模型区域的氨氮浓度对衰减系数及扩散系数进行率定,见表 3。

表 3 模型验证条件汇总表

断面	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	水位/ m	排污量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	COD _{Cr} / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	NH ₃ -N/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
CS1	17500			7.35	0.157
CS2			5000	7.70	0.157
CS3				7.70	0.156
CS7		64.4		7.35	0.153

根据实测资料表 3,验证模型糙率在 0.036 ~ 0.05 之间,与前人验证该河段的糙率范围基本一致^[15],具体模型选取各参数条件见表 2。计算沿程水面线及典型断面流速验证结果见图 3~5,可见水面线和断面流速计算值与实测值吻合较好。

分别得到本模型中的氨氮污染物的衰减系数及扩散系数。选取乐天溪排污口下游约 83 m 的 CS2、1 216 m 的 CS3 两个水质验证断面,验证结果见表 4 所示,可看出氨氮相对误差在 2% 以内,说明水质模拟效果良好。

3.3 工况选取

采用 2016 年 11 月 1:2000 实测地形数据建立三峡大坝至葛洲坝区域的 Mike11^[18]—维河网水动力数学模型。下游边界水位根据葛洲坝调度运行确

定,葛洲坝坝前水位在 63.0 ~ 66.5 m (吴淞高程) 之间,与二维数学模型糙率范围一致,为 0.036 ~ 0.05 之间,计算水面线结果见图 6。可见当上游流量一定时,水面线比降分别为 8×10^{-6} 、 5×10^{-6} ,比降相差极小。本文选取上游流量 5 085 m³/s,葛洲坝坝前水位 63.0 m (吴淞高程) 工况进行水质模型中参数的敏感性分析,即当上游流量为 5 085 m³/s,对应模型下边界水位为 61.3 m。

表 4 水质验证成果表

断面	NH ₃ -N		相对误差/ %
	实测值	计算值	
CS2	0.157	0.159	-1.27
CS3	0.156	0.155	0.64

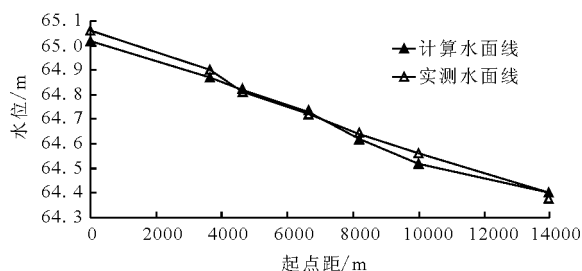


图 3 沿程水面线验证图

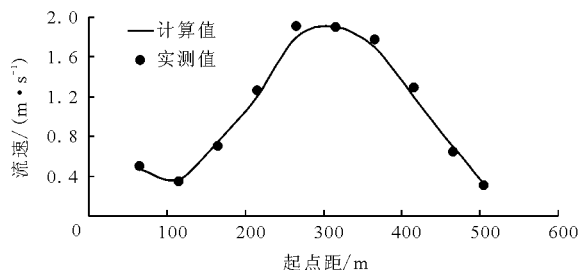


图 5 排污口下游 CS4 断面流速验证图

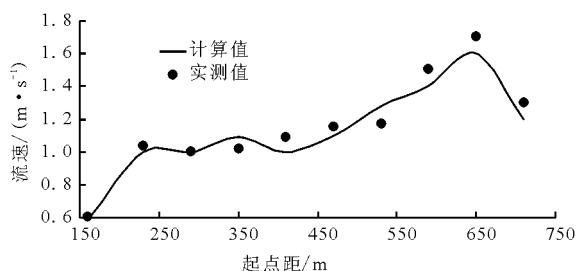


图 4 排污口上游 CS2 断面流速验证图

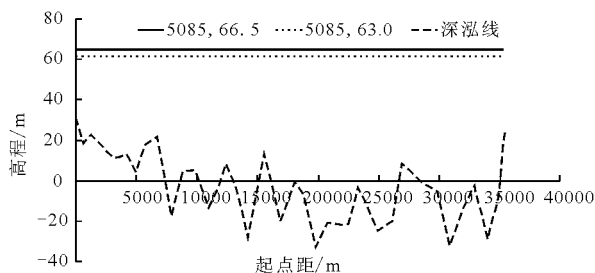


图 6 两坝间深泓线及水面线

结合实测水文、水质监测成果及最不利工况原则,最终确定计算工况见表 5,且污水经排放口进入河流后,皆呈带状贴岸向下游扩散,垂直水流方向影响范围差异不大,故本文中的影响范围仅从顺水流方向考虑。

表 5 设计工况条件

工况	上边界流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	下边界水位/ m	本底浓度/ (mg·L ⁻¹)
1	17500	64.4	0.157
2	17500	64.4	0.096
3	5085	61.3	0.157
4	5085	61.3	0.096

4 敏感性分析结果

4.1 无衰减过程情况

相同本底浓度,不同流量时(见表 6):当本底浓度为 0.157 mg/L、流量为 5 085 m³/s 时,排污口以下出现本底浓度的最大长度为 1 057 m,是流量为 17 500 m³/s 时未超过本底浓度的 45%;当本底浓度为 0.096 mg/L、流量为 5 085 m³/s 时,未超过本底浓度的最大长度为 936 m,是流量为 17 500 m³/s 时未超过本底浓度的 42%。表明相同本底浓度不同流量时,出现本底浓度的范围随着流量的增加而增加。

相同流量下,不同本底浓度(见表 6):当流量为

5 085 m³/s 时,排污口以下出现本底浓度 0.096 mg/L 的最大长度为 936 m,是本底浓度为 0.157 mg/L 的最大长度的 89%;当流量为 17 500 m³/s 时,出现本底浓度 0.096 mg/L 的最大长度为 2 220 m,是本底浓度为 0.157 mg/L 的最大长度的 95%。表明出现本底浓度的范围随着本底浓度的增加而增加。

整体而言,流量相对于本底浓度对水流的扩散能力更敏感。

表 6 排污口以下出现本底浓度的最大长度 m

流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	0.157 mg/L (本底浓度)	0.096 mg/L (本底浓度)	相对占比/ %
5085	1057	936	89
17500	2335	2220	95
相对占比/%	45	42	

4.2 不同流量及不同本底浓度下对污染物的影响程度

郭儒等^[19]、张世坤等^[20]对影响河流中污染物衰减系数的因素进行分析,得出水体中污染物本底浓度与衰减系数有很大关系,但未进行量化说明。本模型中选取不同的本底浓度、不同流量分析污染物的扩散影响长度,见图 7。从图 7 中可看出:

(1)不同流量、相同本底浓度、相同衰减系数的情况下,流量为 17 500 m³/s 的污染物扩散影响长度明显大于流量为 5 085 m³/s,且在本底浓度为 0.157 mg/L、衰减系数为 0.013 d⁻¹时,随着流量的增大,影响范围扩大幅度最大,为 47%。具体来讲,随着流量增加(见表 7):①衰减系数为 0.013 d⁻¹、本底浓度为 0.096 mg/L 时,增大幅度最小,为 20%;②衰减系数为 0.017 d⁻¹、本底浓度为 0.096 mg/L 时增大幅度为 29%;③衰减系数为 0.005 d⁻¹、本底浓度为 0.157 mg/L 时增大幅度为 39%;④衰减系数 0.005 d⁻¹、本底浓度 0.096 mg/L 时增大幅度为 37%。

(2)不同本底浓度、相同流量、相同衰减系数的情况下,本底浓度为 0.096 mg/L 的污染物扩散影响长度明显大于本底浓度为 0.157 mg/L,且在流量为 17 500 m³/s,衰减系数为 0.035 d⁻¹时,污染物扩散范围增大幅度最大,为 53%;具体来讲,随着本底浓度的减小(见表 7):①当流量为 5 085 m³/s、衰减系数为 0.013 d⁻¹时,本底浓度 0.096 mg/L 较 0.157 mg/L 增大了 52%;当流量 5 085 m³/s,衰减系数 0.005 d⁻¹时,本底浓度 0.096 mg/L 较 0.157 mg/L

增大了 34%;②当流量为 17 500 m³/s、衰减系数为 0.013 d⁻¹时,本底浓度 0.096 mg/L 较 0.157 mg/L 影响范围增大了 24%,当流量为 17 500 m³/s、衰减系数为 0.035 d⁻¹时,虽影响范围尺度减小但影响范围增大幅度为 53%;当流量 17 500 m³/s、衰减系数 0.005 d⁻¹时,本底浓度 0.096 mg/L 较 0.157 mg/L 影响范围增大了 32%;当流量 17 500 m³/s、衰减系数 0.017 d⁻¹时,本底浓度 0.096 mg/L 较 0.157 mg/L 影响范围增大 48%。

(3)不同衰减系数、相同流量、相同本底浓度的情况下(图 7),随着衰减系数的增大,污染物扩散影响长度减小,且大流量 17 500 m³/s、低本底浓度 0.096 mg/L 时,影响长度缩小幅度的最大,为 80%。具体来讲(见表 7),相同流量、相同本底浓度时,随着衰减系数的增大:①小流量 5 085 m³/s、本底浓度 0.096 mg/L 时,影响范围缩小了 42%;②大流量 17 500 m³/s、本底浓度 0.157 mg/L 时,影响范围缩小了 72%;③小流量 5 080 m³/s、本底浓度 0.157 mg/L 时,影响范围缩小了 38%。表明大流量低本底浓度因衰减系数取值范围较大,进而污染物的影响范围差别较大。

从不同流量、本底浓度、衰减系数 3 个自变量变化来看,相同工况下不同衰减系数对污染物的扩散范围影响较大,且随着衰减系数的增大,污染物扩散长度随之减小,见图 8、9。

表 7 不同流量、本底浓度下氨氮影响范围统计表 m

流量 (m ³ ·s ⁻¹)	衰减 系数/ d ⁻¹	≥0.157 mg/L (本底浓度) 长度	≥0.096 mg/L (本底浓度) 长度	不同本底 浓度下增 大幅度/%
5085	0.005	2613	3493	34
	0.013	1612	2447	52
	0.017		2028	
	0.005	3634	4781	32
	0.013	2367	2941	24
	0.017	1769	2619	48
17500	0.035	1020	1561	53
	0.043		1248	
	0.052		1074	
	0.060		937	
不同流量下 增大幅度/%		39	37	
		47	20	
			29	
不同衰减系数下 减小幅度/%		38	42	
		72	80	

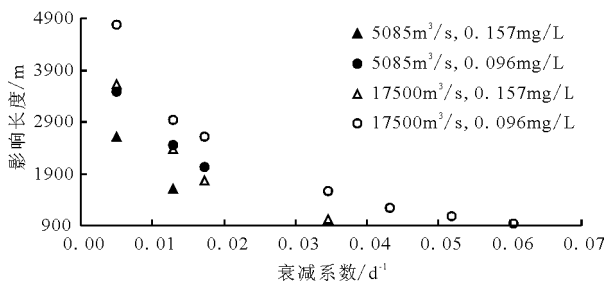
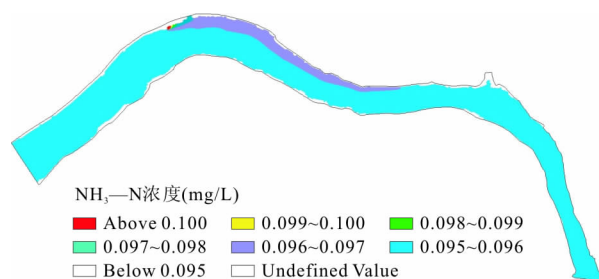
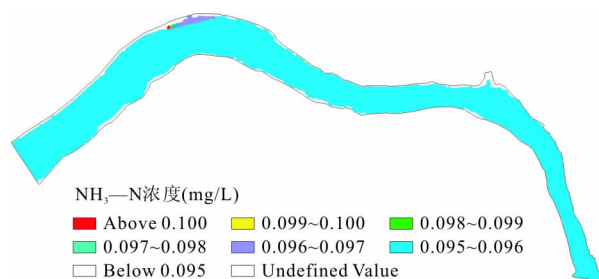


图7 不同工况污染物的扩散影响长度

图8 流量 17 500 m³/s 本底浓度 0.096 mg/L
衰减系数 0.005 d⁻¹ 时 NH₃—N 扩散范围图9 流量 17 500 m³/s 本底浓度 0.096 mg/L
衰减系数 0.060 d⁻¹ 时 NH₃—N 扩散范围

5 结论与展望

基于径流式枢纽的枯季水库两坝调度水体复杂多变特性,根据 2016 年两坝间实测地形数据通过 Mike21 建立平面二维水质模型模拟计算,采用黄陵庙枯水期流量确定计算工况。在枯水期时模拟污染物氨氮在排污口附近浓度分布规律,并对衰减系数进行敏感性分析,得出以下主要结论:

从影响区域的相对占比来看,流量较本底浓度对水流的扩散能力影响更敏感;随着衰减系数的增大污染物扩散范围减小;相同本底浓度和衰减系数下,大流量时污染物的扩散范围明显大于低流量;相同流量和衰减系数下,低本底浓度时污染物的扩散范围明显大于高本底浓度;大流量 17 500 m³/s 低本底浓度 0.096 mg/L 工况下随着衰减系数变化,引起的的影响范围变化幅度在 68% 左右,而小流量 5 085 m³/s 低本底浓度 0.096 mg/L 时随着衰减系数变

化,引起的的影响范围变化幅度在 17% 左右,表明大流量且本底浓度较低时随着衰减系数的变化,造成的影响范围最大。因此建议流量大、本底浓度较低时,用实测数据对衰减系数进行率定和敏感性分析,以提高计算结果的准确性和合理性。

在实际计算过程中,受污染源概化、设计流量、本底浓度、污染物综合衰减系数等设计条件及模型主要参数对计算结果的影响,对模型计算有较大的影响。网格间距大的地形其扩散系数比网格间距小的地形的扩散系数大,且 x 、 y 方向的取值可以不同;是相当重要的基础参数,一般采用保守物质进行率定,如盐度或示踪剂进行率定,本文结合经验确定扩散系数为 1 m²/s,研究不同设计工况组合下,衰减系数的变化规律,未进行扩散系数影响分析,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] EDEN G E, TRUESDALE G A, STENNETT G V. Assessment of biodegradability [J]. Water Pollution Control, 1968, 87(3): 107 - 108.
- [2] FISCHER W K, GERIKE P. Biodegradability determinations via unspecific analyses (chemical oxygen demand, dissolved organic carbon) in coupled units of the OECD confirmatory test - II. Results [J]. Water Research, 1975, 9(12): 1137 - 1141.
- [3] FILIPPELLI G M. Carbon and phosphorus cycling in anoxic sediments of the Saanich Inlet, British Columbia [J]. Marine Geology, 2001, 174(1): 307 - 321.
- [4] EDLUND G, CARMAN R. Distribution and diagenesis of organic and inorganic phosphorus in sediments of the Baltic proper [J]. Chemosphere, 2001, 45(6): 1053 - 1061.
- [5] TROEV K, TODOROVA N, MITOVA V, et al. Phosphorus - containing oligoamides obtained by a novel one - pot degradation of polyamide - 6 [J]. Polymer degradation and stability, 2006, 91(4): 778 - 788.
- [6] 吴国平. 入河排污口管理有关问题探讨 [J]. 人民长江, 2008, 39(23): 14 - 16.
- [7] 冯帅, 李叙勇, 邓建才. 太湖流域上游河网污染物降解系数研究 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3127 - 3136.
- [8] 冯帅, 李叙勇, 邓建才. 平原河网典型污染物生物降解系数的研究 [J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1724 - 1733.
- [9] 张亚丽, 申剑, 史淑娟, 等. 淮河支流污染物综合降解系数动态测算 [J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 64 - 67.
- [10] 张文志. 采用一维水质模型计算河流纳污能力中设计条件和参数的影响分析 [J]. 人民珠江, 2008(1): 19 - 20 + 43.

(下转第 102 页)

- 2014,29(3):336-343.
- [9] 武玮婷,毕硕本,王军,等. 清代广西洪涝灾害时空特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2017,39(4):609-617.
- [10] 孙金岭,何元庆,何则,等. 基于 Morlet 小波的清代民国河西走廊洪涝灾害与气候变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(1):60-65.
- [11] 楚纯洁,赵景波. 开封地区宋元时期洪涝灾害与气候变化[J]. 地理科学,2013,33(9):1150-1156.
- [12] 毕硕本,钱育君,陈昌春,等. 1470-1912 年西北东部地区旱涝等级重建序列的特征及对比分析[J]. 干旱区地理,2016,39(1):12-21.
- [13] 温克刚,翟佑安. 中国气象灾害大典:陕西卷[M]. 北京:气象出版社,2005.
- [14] 袁林. 西北灾荒史[M]. 兰州:甘肃人民出版社,1994.
- [15] 水利电力部水管司科技司,水利水电科学研究院. 清代黄河流域洪涝档案史料[M]. 北京:中华书局,1993.
- [16] 中华人民共和国水利部. 洪涝灾情评估标准:SL 579-2012[S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [17] LAMB H H. Climatic history and the future[M]. Princeton University Press,1985.
- [18] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis: contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007.
- [19] 姚檀栋,焦克勤,杨志红,等. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化[J]. 中国科学(B辑:化学生命科学 地学),1995,25(10):1108-1114.
- [20] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨,等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2004,34(2):145-153.
- [21] 李旺,郭金运,赵春梅,等. 1700-2012 年太阳黑子周期性变化的小波分析[J]. 测绘科学技术学报,2015,32(2):125-129.
- [22] 葛全胜,刘路路,郑景云,等. 过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局[J]. 地理学报,2016,71(5):707-717.
- [23] 窦睿音,延军平. 关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(8):76-82.
- [24] 郝志新,耿秀,刘可邦,等. 关中平原过去 1000 年干湿变化特征[J]. 科学通报,2017,62(21):2399-2406.
- [25] 金祖辉,陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究[J]. 大气科学,1999,23(6):663-672.
- [26] 赵强,严华生,程路. ENSO 发展和衰减阶段的陕西夏季降水异常特征[J]. 应用气象学报,2013,24(4):495-503.
- [27] 李芬,张建新,郝智文,等. 山西降水与 ENSO 的相关性研究[J]. 地理学报,2015,70(3):420-430.

(上接第 96 页)

- [11] 彭振华,尤爱菊,徐海波. 河流纳污能力计算一维模型主要参数的取值分析[J]. 浙江水利科技,2016,44(6):46-49.
- [12] 黄苗,冯雪,赵鑫,等. 基于数值模拟的纳污能力计算方法探讨[J]. 长江科学院院报,2015,32(6):15-19.
- [13] 万咸涛,张新宁. 三峡大坝与葛洲坝两坝间水域的水环境保护[J]. 水资源保护,2003,(4):31-33+62.
- [14] DHI. MIKE21. flow model, hydrodynamic module user guide;Edition,2014[Z]. Horsholm, Denmark: DHI Water and Environment, 2014.
- [15] 中华人民共和国水利部. 水域纳污能力计算规程 GB/T25173-2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [16] 廖文辉,韩龙喜. 三峡大坝至葛洲坝间沿程水污染一维预测模拟[J]. 水文,2001,21(2):28-30.
- [17] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准 GB 18919-2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [18] DHI. MIKE11. A modeling system for rivers and channels user guide; Edition 2014[Z]. Horsholm, Denmark: DHI Water and Environment, 2014.
- [19] 郭儒,李宇斌,富国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析[J]. 气象与环境学报,2008,24(1):56-59.
- [20] 张世坤,张建军,田依林,等. 黄河花园口典型污染物自净降解规律研究[J]. 人民黄河,2006,28(4):46-47.