

大型水库水质数值模拟及应用

王 敏 姜利兵 周伟东 郜学军

(环境与移民工程院)

[摘要] 为了解拟建马莲河水库蓄水后水质变化趋势,本文预测了水库蓄水后平水年库区 COD_{cr} 、氨氮、总磷常规水质因子状况。以 EFDC 模型为基础,马莲河平水年来水流量及供水流量、水质等为计算边界,建立了马莲河水库二维水质模型,模拟分析马莲河水库库区水质情况。结果表明:拟建的马莲河水库蓄水后,在水库上游来水水质满足水功能区水质要求的前提下,马莲河库区坝前、库中水体水质总体良好,平水年 COD_{cr} 、总磷、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均可水功能区水质标准要求。库区水体水质主要受到上游来水水质的影响。来水浓度较高时,坝址断面 COD_{cr} 、总磷、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度偏高。来水浓度较低时,坝址断面 COD_{cr} 、总磷、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度偏低。

[关键词] EFDC 马莲河水库 水质模型

水库工程的建设带来巨大经济效益的同时,也带来了严重的环境问题,其中水质污染尤为突出。水质预测是水污染防治的基础工作,自 1925 年美国工程师 Streete 和 Phelps 提出第一个溶解氧平衡模型以来(简称 S-P 模型)^[1],水质模型的研究就有了很大的发展。在 S-P 模型的基础上美国国家环境保护署(USEPA)提出了 QUAL-I、QUAL-II 模型^[2];此后 Tim-id. 提出了动态 WASP 模型^[3]。在过去的数十年里,水动力和水质模型已经从单一的一维、稳态流模型发展到复杂的三维、非恒定流模型,耦合了水动力、悬浮物、有毒无助和富营养化等过程。目前水质模型仍以欧美发达国家所开发为主,目前流行的有 EFDC 模型、MIKE 模型、Delft3D 模型、SMS 模型、WASP 模型、QUAL2E 和 QUAL2K 等^[4~6]。水动力及水质模块是 EFDC 模型中两个最核心的模块,技术已非常成熟,甘衍军等^[7]采用 EFDC 模型模拟了二滩水库水温分层特征;赵一慧等^[8]采用 EFDC 模型研究了小浪底水温分布特征;谢锐等^[9]选用 EFDC 模型模拟了长江口三维水流运动,均取得了较好的研究成果。本文利用 EFDC 软件进行水库水质模拟,分析建库后马莲河库区 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总磷变化规律,可为水库水环境管理、水污染防治提供理论基础。

究所开发,是基于 Boussinesq 假定的数学模型。EFDC 模型是集水动力模块、泥沙输运模块、污染物运移模块和水质预测模块一体^[10],可以用于河流、湖泊、水库、湿地和近岸海域不同时空尺度的流场、水温、泥沙以及水质等因子的模拟。EFDC 模型采用 FORTRAN 语言编制,可通过设置初始化文件和时序输入文件调整模拟维数、时空特性、环境条件和负荷等,适用于特定湖库模拟和情景分析。EFDC 模型主要框架见图 1^[11]。

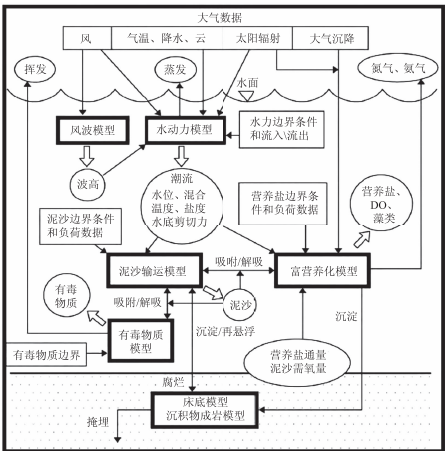


图 1 EFDC 的主要框架和单元

EFDC 水动力学方程假定垂向静压,水平方向采用曲线正交坐标系,水质方向采用 δ 坐标变换,沿重力方向分层,求解三维紊动粘性方程,水平边界拟合正交曲线坐标系和垂向 δ 坐标系下控制方程。

1 EFDC 模型介绍

环境流体动力学模型 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 由美国佛吉尼亚海洋科学研

作者简介:王 敏(1983—),女,山东省郓城人,高级工程师,硕士,从事环境保护与影响评价工作。

①连续方程:

$$\partial_t(m_x m_y H) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hn) + \partial_z(m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{ss} + Q_{sw}) \quad (1)$$

②动量方程:

$$\partial_t(mHu) + \partial_x(m_y Huu) + \partial_y(m_x Hvu) + \partial_z(m\omega u) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv = -m_y H\partial_y(g\zeta + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z u) + Q_u \quad (2)$$

$$\partial_t(mHv) + \partial_x(m_y Huv) + \partial_y(m_x Hvv) + \partial_z(m\omega v) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu = -m_x H\partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z v) + Q_v \quad (3)$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (4)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) + \partial_z(m\omega) = 0 \quad (5)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y H \int_0^1 u dz) + \partial_y(m_x H \int_0^1 v dz) = 0 \quad (6)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (7)$$

③水温输移方程:

$$\begin{aligned} &\partial_t(m_x m_y HT) + \partial_x(m_y HuT) + \partial_y(m_x HvT) + \partial_z \\ &(m_x m_y \omega T) = \partial_x\left(\frac{m_y}{m_x} HA_H \partial_x T\right) + \partial_y\left(\frac{m_x}{m_y} HA_H \partial_y T\right) + \partial_z \\ &\left(m_x m_y \frac{A_b}{H} \partial_z T\right) + m_x m_y H\Phi_1 + S_t \end{aligned} \quad (8)$$

其中 sigma 坐标变换前的垂向速度 ω^* 与变换后的垂向速度 ω 间的关系为:

$$\omega = \omega^* - z(\partial_x \zeta + um_x^{-1} \partial_x \zeta + vm_y^{-1} \partial_y \zeta + (1-z)(um_x^{-1} \partial_x h + vm_y^{-1} \partial_y h)) \quad (9)$$

上述方程组中:

u 和 v 分别为曲线正交坐标 x 和 y 方向上的水平速度分量; m_x 和 m_y 为坐标变换因子; $H = h + \zeta$ 为总水深, h 为河底高程, ζ 为水位; f 为 Coriolis 系数; A_v 为垂直紊动粘性系数; Q_u 和 Q_v 为动量源汇项; ρ 为扰动密度, 一般为温度和盐度等的函数; ρ_0 为参考密度; p 为由密度的变化引起的动水压强; b 为浮力; Q_H 为体积源和汇, 包括降雨、蒸发、以及可以忽略动量通量的侧向入流和出流的源漏项; Q_{ss} 和 Q_{sw} 为在河床和水体之间的沉积物和水量的净容积通量, 其中从河床到水体的方向被定义为正; $\delta(0)$ 函数为进入水体底层的通量; A_b 和 A_H 分别为垂直紊动扩散系数和水平紊动扩散系数; $\frac{m_y}{m_x} HA_H$, $\frac{m_x}{m_y} HA_H$, $m_x m_y \frac{A_b}{H}$ 分别为 x 、 y 和 z 方向上的湍流热扩散系数; T 为水温; Φ_1 为进入水体的太阳短波辐射量; S_T 为水体与大气之间的热通量。

④水质模块控制方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x, \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y, \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z, \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_c \end{aligned} \quad (10)$$

其中: C 为水质状态变量浓度; u, v, w 为 x, y, z 方向速度分量; K_x, K_y, K_z 为 x, y, z 方向的湍流扩散系数; S_c 为每单位体积内部与外部的源和汇。

若只对物理输运过程求解, 那么可将其简化为下式^{[12]~[14]}:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x, \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y, \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z, \frac{\partial C}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

而大多数水质模型都是采用一阶动力学, S_c 对 C 线性变化, 上式可变为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \cdot C + R \quad (12)$$

式中, k 为动力学速率; R 为由于外部负荷和/或内部反应引起的源汇项。

2 工程概况

马莲河是泾河最大的一级支流, 黄河三级支流, 发源于宁夏回族自治区盐池县麻黄山和陕西省定边县的白于山一带。河流全长 374.8 km, 干流河道平均比降约 1.35‰, 多年平均径流量 3.56 亿 m^3 , 流域整体水资源利用率较低。

贾咀水库坝址位于泾河一级支流马莲河入泾河口以上 50 km 处, 属庆阳市宁县辖境, 下距宁县县城 10 km, 是一座以供水、灌溉为主的大型水利枢纽工程。水库最大回水长度为 47.5 km, 库区面积为 26.11 km^2 , 总库容 4.79 亿 m^3 。马莲河水库死水位 982 m, 拦沙库容 2.23 亿 m^3 , 正常蓄水位 999 m。马莲河水库属于国务院确定的 172 项重大水利工程之一。

3 模型建立

3.1 库区网格划分

根据马莲河水库淹没区地形测量数据, 对库区地形进行线性插值, 构建数字高程模型。水库正常蓄水位时, 主库区回水至上游约 47.5 km 处, 取该段河道作为研究区域。库区河道横向概化为 25 个网格, 平均宽度为 50 m; 网格间距不等, 约为 30~140 m(平均 80 m); 研究区域共有 8 159 个网格。马莲河水库库区模型计算网格及地形高程图如图 2 所示。

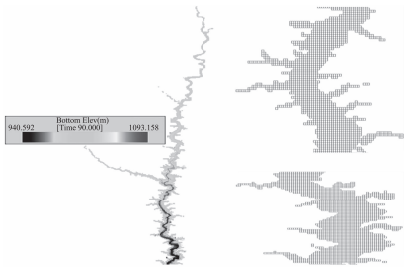


图2 水库库区模型计算网格(局部)及地形高程图

3.2 边界及初始条件

选用坝址邻近的宁县气象站观测的数据作为模型的部分边界条件(见表1)。气象站测量数据有气温、相对湿度、蒸发、太阳短波辐射、云量和风速

等,数据采用月平均值。
根据模拟计算要求,模型共设3个上边界,2个下边界,均为流量边界。模型上边界分别支流太乐沟、赵家川流量、干流入库库尾流量,入库流量根据来水流量得到。模型下边界为设计泄水流量,分别为供水流量及生态环境流量。流量采用平水年(P=25%)日均流量值,水库库尾流量值见图3。

水质因子选取COD_{cr}、总磷(TP)和氨氮(NH₃-N)等常规水质因子进行预测分析。初始水质参数设为2018年1月初马莲河水库坝址断面实测值,水温为0.1℃,COD_{cr}、总磷(TP)和氨氮(NH₃-N)浓度分别为28 mg/L、0.08 mg/L和1.3 mg/L。

表1 边界条件的月平均值

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均气温/℃	-5.0	-0.5	6.2	12.3	16.9	21.2	23.0	21.7	16.4	10.5	3.4	-3.0
平均相对湿度/%	56	61	63	61	63	59	72	75	80	77	72	64
平均风速/m·s ⁻¹	1.1	1.2	1.5	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1
云量(0.1)	6.6	7.0	6.6	6.7	7.2	7.1	8.1	8.0	8.1	7.2	5.7	5.9
太阳辐射强度/W·m ⁻²	160	181	199	213	262	280	292	285	210	190	185	165
入流温度/℃	0.1	2.2	7.8	12.6	16.3	20.1	22.5	21.4	17.9	11.5	5.2	1.3

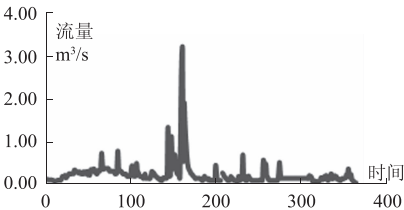


图3 水库库尾入流流量数据

3.3 参数确定

由于马莲河水库为拟建水库无法采用实测数据对水质参数进行率定。本文根据模型参数的影响规律,采用试算法对其进行率定,即根据经验公式先给出参数初始取值。根据计算式(13)计算,并根据《全国水环境容量核定技术指南》的参数范围,参考《原型观测法在确定九龙滩水库污染物降解系数中的应用》^[15]、《大型水库三维水质模型研究》^[16]中对水库降解系数的研究,确定主要预测因子水质降解系数,见表2。

表2 马莲河水利枢纽库区主要污染物水质降解参数

参数	描述(d ⁻¹)	取值
K _{COD_{cr}}	化学需氧量降解速率	0.008
KE _b	背景消光系数	0.45
K _{RP}	难溶解颗粒有机磷水解速率	0.003
K _{LP}	易溶解颗粒有机磷水解速率	0.01
K _{DP}	溶解有机磷矿化速率	0.01
K _{RN}	难溶解颗粒有机氮水解速率	0.005
K _{LN}	易溶解颗粒有机氮水解速率	0.075
K _{DN}	溶解有机氮矿化速率	0.05
rNitM	最大硝化速率	0.06

$$S_{\phi} = -k_{(20^{\circ})}\theta^{T-20}C \tag{13}$$

式中:S_φ为源汇项,mg/L;k(20°)是水温为20℃时各水质组分的降解系数;θ为各水质组分的温度修正系数;C为相应水质组分的浓度,mg/L。

4 水质预测结果及分析

利用上述建立的马莲河库区水质模型以及选取的边界条件,模拟出平水年库区水质分布状况,可为水库蓄水后库区水环境管理提供依据。模拟结果见表3,图4。在水库上游来水水质满足水功能区水质要求(Ⅳ类)的前提下,马莲河库区坝前、库中水体水质总体良好,平水年模拟指标均可满足《地表水环境质量标准》Ⅳ类水标准要求。

图4,表3分别给出了库中和坝址断面丰水期、平水期、枯水期COD_{cr}、总磷和NH₃-N浓度变化。现状来流水体中丰水期COD_{cr}、总磷和NH₃-N浓度较高,主要是由于丰水期入流流量较大,随着水量带来较多的污染物。但由于库中和库尾流速较低、水体停留时间较长,COD_{cr}、总磷和NH₃-N在库区随流运输的过程中得到长时间的降解,因此库中和坝址断面COD_{cr}、总磷和NH₃-N浓度均满足Ⅳ类水质目标要求。

在现状入流情况下,库区水体水质主要受到上游来水水质的影响,随着水库来流的不断汇入,库区水体逐渐被来流水体替换。丰水期上游来水

COD_{cr}、总磷、NH₃-N 浓度较高,坝址断面 COD_{cr}、总磷、NH₃-N 呈相应变化。枯水期来水中的 COD_{cr}、总

磷、NH₃-N 浓度较低,故坝址断面中的 COD_{cr}、总磷、NH₃-N 浓度也偏低。

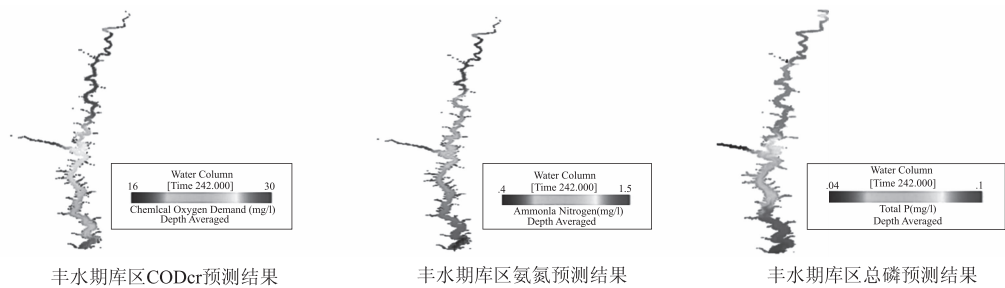


图 4 库区水库丰水年水质预测结果

表 3 贾咀库区平水年各水期库区水质浓度分布 (mg/L)					
位置	水期	COD _{cr}	氨氮	总磷	水质评价结果
库中	平水期	22	0.74	0.081	Ⅳ
	丰水期	25	0.89	0.083	Ⅳ
	枯水期	23	0.81	0.082	Ⅳ
坝前	平水期	19	0.52	0.050	Ⅳ
	丰水期	21	0.63	0.054	Ⅳ
	枯水期	20	0.55	0.049	Ⅳ

5 结论

基于 EFDC 模型建立的马莲河水库二维水动力和水质模型,可以定量反映马莲河水库的水动力和水质变化过程,对马莲河水库蓄水后的水环境管理具有一定的参考价值。

(1)拟建的马莲河水库蓄水后,在水库上来水水质满足水功能区水质要求(Ⅳ类)的前提下,马莲河库区坝前、库中水体水质总体良好,平水年 COD_{cr}、总磷、NH₃-N 浓度均可满足《地表水环境质量标准》Ⅳ类水标准要求。

(2)库区水体水质主要受到上游来水水质的影响。来水浓度较高时,坝址断面 COD_{cr}、总磷、NH₃-N 浓度偏高。来水浓度较低时,坝址断面 COD_{cr}、总磷、NH₃-N 浓度偏低。

参考文献

[1] 胡乃利. 玉清湖水库水质评价及预测研究[D]. 济南: 山东大学,2008.

[2] Seok Soon Park, Yong Seok Lee. A water quality modeling study of the Nakdon[J]. River Ecological Modeling, Korea, 2002, 152:65 – 75.

[3] Timid. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version6.0, Draft :User’s Manual [C]. Region 4 Atlanta, GA, USEPA MSTetraTech, Inc,2001.

[4] 段扬. 基于 EFDC 的丹江口水库水环境数值模拟分析 [D]北京:中国地质大学(北京),2014.

[5] 韩雅琼,沈永明. 基于 EFDC 的渤海冬夏季环流及其

影响因素的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2013,28(6): 733 – 743.

[6] 宋策,周孝德,辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J]. 水科学进展,2011,22(3): 421 – 430.

[7] 甘衍军,李兰,武见,等. 基于 EFDC 的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(4):476 – 485.

[8] 赵一慧,逢勇. 基于 EFDC 模型的小浪底水库水温研究[J]. 四川环境,2017,36(4): 24 – 31.

[9] 谢锐,吴德安,严以新,等. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2010,25(2): 165 – 174.

[10] Hamrick JM. A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational As-pects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report,1992,317: 1 – 63.

[11] 季振刚. 水动力学和水质——河流、湖泊及河口数值模拟[M]. 北京:海洋出版社,2012.

[12] Cerco, C. F., and Cole, T. 1994. Three-dimensional Eutrophication Model of Chesapeake Bay. Volume 1: Main Report EL-94-4. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station.

[13] Park, K., A. y., Shen, J., and Hamrick, J. H. 1995. A Three-dimensional Hydrodynamic Eutrophication Model (HEM-3D):Description of Water Quality and Sediment Processes Submodels. The college of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report 327,113pp.

[14] Park, K., Jung, H. S., and Ahn, S. M. 2005. Three-dimensional Hydrodynamic Eutrophication Model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea. Marine Environment Research,60(2):171 – 193.

[15] 刘中峰,曹玲玲,冯镜洁. 原型观测法在确定九龙潭水库污染物降解系数中的应用[J]. 水利水电科技进展,2014,34(2): 68 – 75.

[16] 刘中峰,李然. 大型水库三维水质模型研究[J]. 水利水电科技进展,2010,30(2): 5 – 9.