



移动扫码阅读

焦瑞峰,宋张杨,李娅芸. 河道型水库水环境同化容量研究——以小浪底水库为例[J]. 能源环境保护, 2021, 35(6): 102-108.

JIAO Ruifeng, SONG Zhangyang, LI Yayun. Research on the water environmental assimilative capability of channel reservoir: Taking the Xiaolangdi Reservoir as an example[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(6): 102-108.

河道型水库水环境同化容量研究 ——以小浪底水库为例

焦瑞峰, 宋张杨, 李娅芸

(黄河水资源保护科学研究院, 河南 郑州 450004)

摘要: 基于入库污染物混合稀释和污染物综合衰减理论, 建立了河道型水库水质模型。根据物料平衡原理, 建立了入库水和水库原有蓄水中污染物衰减的动力学一级反应模型。以小浪底水库为例, 结合实际监测数据对模型进行检验, 检验结果表明, 污染因子氨氮和 COD 的浓度平均相对误差为 19% 和 15%。根据模型计算得出不同水文条件下的小浪底水库水环境同化容量。

关键词: 水环境同化容量; 河道型水库; 模型; 水质

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)06-0102-07

Research on the water environmental assimilative capability of channel reservoir: Taking the Xiaolangdi Reservoir as an example

JIAO Ruifeng, SONG Zhangyang, LI Yayun

(Yellow River Water Resources Protection Research Institute, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Based on the mixed dilution theory and comprehensive attenuation theory of pollutants, a water quality model of river reservoir was established. According to the principle of material balance, a first-order kinetic reaction model of pollutant attenuation in inflow and reservoir storage was established. Taking Xiaolangdi Reservoir as an example, the model was tested by comparing the calculated values with the actual monitoring data. The test results showed that the average relative errors of the concentrations of ammonia nitrogen and COD were 19% and 15%. Through the established model, the water environmental assimilative capacity of Xiaolangdi Reservoir under different hydrological conditions was obtained.

Key Words: Water environmental assimilative capability; Channel reservoir; Model; Water quality

0 引言

水环境同化容量反映的是水体综合自净能力, 不包括水体对污染物的稀释差值容量。河道型水库水环境同化容量的确定, 是制订河流水资源保护规划重要的基础工作。河流或水库水环境同化容量的计算, 首先需要建立合适的水质模型。建立的水质模型准确度越高, 通过水质模型计算的水环境同化容量精度越好。

利用河流一维偏微分方程水质模型可以较精确描述河道型水库污染物的运动规律, 尤其是采用有限元法进行数值解能够减少数值解过程中的数值弥散现象^[1]。在模型参数率定方面, 方法较多。现场示踪法, 针对小浪底这种大型河道型水库经济投入巨大, 不适用其参数率定。经验公式、实验室法, 其率定的模型参数精度不高, 对偏微分方程水质模型的准确性有较大影响。

为了提供准确、简便计算河道型水库水环境

同化容量的方法,以黄河小浪底水库为例,在掌握入库污染物在小浪底水库停留时间的规律基础上,建立动态河道型水库水质模型,并采用水质现状实测法率定模型参数。预测水库下泄水水质,计算小浪底水库水环境同化容量。

1 小浪底水库概况

小浪底水库位于黄河中游豫、晋两省交界处,穿梭秦岭山系邙山和中条山、王屋山峡谷之中,库首(三门峡坝下)至小浪底坝址全长约 131 km,库区河谷上窄下宽呈东西带状,为典型峡谷河道型水库。入库水流经库区到达水库下泄水口时混合较均匀。

小浪底水库“以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电”的大型综合利用水利枢纽,采用蓄清排浑运作方式运用,非汛期下泄水通常为清水,汛期则为浑水。

小浪底水库 98% 的水量来自于上游三门峡水库下泄水,库容 126.5 亿 m^3 。主汛期 7~9 月,小浪底水库运用水位为 230~254 m,并利用 254 m 水位的库容进行调水调沙。通常主汛期前的小洪峰水质较差,主汛期末上游来水水质相对较好。因此,每年 10 月小浪底水库下泄水水质比其它月份的水质明显好。

2 影响河道型水库水环境容量的主要因素

在河道上修建大坝,河道成为河道型水库,河槽蓄水成为水库蓄水。这时的河道蓄水量、入库污染物在水库的停留时间以及入库污染物和水库原有的污染物发生耗氧衰减和厌氧衰减的时间比筑坝前有较大增加,水库中的污染物浓度稍为降低一点,都将引起水库污染物质有较大的减少(因为水库污染物质是污染物浓度与水库蓄水量的乘积),进而使得河道型水库具有较大的水环境容量,具体体现在水库下泄水水质明显优于入库水质^[2-7]。影响河道型水库水环境容量的主要因素有:入库污染物在水库的衰减程度和水库蓄水质(决定着水库是否具有稀释能力)。入库污染物在水库衰减程度主要受入库污染物在水库停留时间以及水库水温制约。

2.1 入库污染物在水库停留时间

与河道相比,河道型水库库区水体流速较低,入库水质劣于水库水质时,入库污染物扩散作用突出,入库污染物比其载体(水)运动得快,达到水

库下泄水口的时间(即入库污染物在水库停留时间)比水力停留时间短,水库下泄水污染物浓度峰值容易出现坦化现象和拖尾现象,尤其是入库污染物浓度较高时。例如,黄河小浪底水库建库前,河水流速较快,进入库区河段(即建库后的库区河段)的污染物很快流出该河段,特别是汛期进入库区河段的污染物,通常只需 1 天左右的时间即可流出该河段,而非汛期大约需要 2 天的时间;建库后,库区内河水流速较慢,入库污染物在库区河段停留时间通常在 0.5~2.0 月范围内。可见入库污染物在库区河段的停留时间,建库后远大于建库前。

入库污染物在河道型水库的停留时间受水库水文条件(如:水库蓄水量和水库下泄水流量)、过水断面特征、入库污染物浓度(入库水质劣于水库水质时,入库污染物扩散作用明显)以及水库形态等多因素影响。

对多年小浪底水库水文和水质监测资料分析发现,水库下泄水流量与蓄水量的比值越低,入库污染物浓度越高,入库污染物扩散作用越突出,入库污染物达到水库下泄水口的时间比水力停留时间越短,水库下泄水污染物浓度峰值出现坦化现象和拖尾现象越加明显。当小浪底水库月平均下泄水流量(Q)大于 $4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{月}$ 及水库蓄水量(V)小于 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时,入库污染物在小浪底水库停留时间基本符合以下经验式:

$$t = \frac{aV}{bQ + V} \quad (1)$$

式中: t 为入库污染物在小浪底水库停留时间,月; V 为水库有效交换蓄水量($V = \alpha V_{\text{总}}$, 亿 m^3); Q 为水库月平均下泄水流量, $10^8 \text{ m}^3/\text{月}$; a 、 b 为与水库形态有关的经验系数,无量纲。根据经验,(1)式中 a 、 b 取值范围分别大约处于 1.5~2.5 和 0.8~2.0 范围内。

2.2 水库水温

水体温度对可衰减污染物衰减影响较大。水温越高,污染物衰减速度越快,同样长的时间里污染物衰减得越多。因此,河道型水库水温越高,入库污染物衰减得越多,水库能够接纳的污染物质越大(即水库水环境容量越大),反之水库水环境容量越小。

3 动态河道型水库水质模型推导

河道型水库污染物的水环境行为极为复杂,

其中最主要的行为是混合稀释及污染物综合衰减。水库水质模型研究始于上个世纪 80 年代,进入二十一世纪,随着科学技术的发展和对水库认识的提高,水库水质模型研究有了长足的进展。Gerard 等^[8]首先建立 $k-\varepsilon$ 紊流双方程密度流模型,美国陆军工程师团水道实验站对其进行了改进,提高了模型的计算精度^[9]。邢立文等^[10]采用 Elman 神经网络模型对水库进行水质与水环境质量评价,适用性较高,满足水库水质等级评价。李添雨等^[11]基于 MIKE21 建立水库水量水质响应模拟模型,对水库的水量与水质关系有了进一步的探讨。但雨生等^[12]运用分形插值法建立水库水质评价模型,具有较高的分类精度,在水质综合评价中具有良好的适用性。李韶慧等^[13]在层次分析法和熵权法组合确定各评价指标权重的基础上,结合贝叶斯模型对水库进行水质评价,区分了各评价因子对水质贡献的差异性,同时对水质进行了较为精确的评价。

为了建立简便实用的水质模型用于河道型水库水环境同化容量计算,以下主要从入库污染物混合稀释和污染物综合衰减方面考虑建立河道型水库水质模型。

河流水资源保护规划通常将水库作为一个节点进行水质规划,因而更加关注水库下泄水水质(与水库库区水质相比)。因此,以水库下泄水口处作为节点断面,将河道型水库概化为部分混合均匀反应器,并认为入库水和水库原有蓄水水中的污染物衰减服从动力学一级反应,将出入库水划分一系列水体单元(n 个单元),建立动态水库水质模型。各出入库水体单元历时时间记为 t_1 (t_1 越小,相应的水文、水质测定频率以及建立的水质模型准确度也越高)。各出入库水体单元水量和污染物量可以是恒定的也可以是非恒定的,水体单元内流量和污染物浓度认为是恒定的。

根据节点断面水和污染物输入、输出量遵守平衡原理^[14],建立水量平衡关系式和污染物量平衡关系式,进而推导出河道型水库水质模型。入库污染物浓度,由于入库污染物扩散、水流紊动扩散和血流不均匀离散作用^[15](以下统称为综合混合扩散作用),使得入库污染物往往比其载体(水)运动得快,入库污染物比入库水体先到达节点断面(也就是说入库污染物在水库停留时间与水力停留时间短)。这就使得第 i 出库水体单元水量平衡关系式和污染物量平衡关系式中,水量

输入量和污染物输入量通常不是同一个入库水体单元,往往是水量输入量为第 i 入库水体单元的水量(Q_{λ_i}),而污染物输入量为第 $i-n$ 入库水体单元污染物量(即 $Q_{\lambda_{i-n}}C_{\lambda_{i-n}}$)。对于第 i 出入库水体单元的水量和污染物量存在以下平衡关系:

(1) 水量平衡

若入库水体单元水量记为 Q_{λ_i} 、出库水体单元水量记为 $Q_{\text{出}i}$,第 i 出库水体单元水开始和终止出库时水库蓄水量分别记为 V_{i-1} 、 V_i ,则第 i 出库水体单元水量平衡关系式:

$$V_{i-1} + Q_{\lambda_i} - Q_{\text{出}i} = V_i \quad (2)$$

(2) 污染物量平衡

同样对于第 i 出库水体单元,该水体单元的水刚开始流出水库时,第 $i-n$ 入库水体单元的污染物通过扩散、水流紊动扩散和血流不均匀离散作用,入库 t 时间后在第 i 出库水体单元刚开始流出水库时到达节点断面,并与水库蓄水混合稀释后流出水库形成第 i 出库水体单元(出库水量记为 $Q_{\text{出}i}$ 、污染物浓度记为 C_i),这时水库蓄水量记为 V_{i-1} 、污染物浓度记为 C_{i-1} ,其污染物量 $\alpha V_{i-1}C_{i-1}$ (α 为水库蓄水量有效混合系数)。

第 i 出库水体单元结束流出水库时(即经过一个水体单元时间 t_1),水库污染物量成为 $\alpha V_{i-1}C_{i-1}e^{-Kt_1}$ (其中 K 为水库污染物综合衰减系数),第 $i-n$ 入库水体单元的污染物到达节点断面的量为 $Q_{\lambda_{i-n}}C_{\lambda_{i-n}}$ ($Q_{\lambda_{i-n}}$ 、 $C_{\lambda_{i-n}}$ 分别为该水体单元入库水量和污染物到达节点断面的浓度,该入库水体单元刚入库时的初始污染物浓度为 $C_{\lambda_{i-n}}^0$),这时水库蓄水量记为 V_i 、水库污染物浓度为 C_i ,水库污染物量为 $\alpha V_i C_i$)。第 i 出库水体单元污染物量平衡关系式:

$$\alpha V_{i-1}C_{i-1}e^{-Kt_1} + Q_{\lambda_{i-n}}C_{\lambda_{i-n}} - Q_{\text{出}i}C_i = \alpha V_i C_i \quad (3)$$

水温对污染物的衰减有一定的影响,不同水温下污染物综合衰减系数校正如下:

$$K = K^{20}\theta^{T-20} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式,移项得到:

$$C_i = \frac{\alpha V_{i-1}C_{i-1}e^{-K^{20}\theta^{T-20}} + Q_{\lambda_{i-n}}C_{\lambda_{i-n}}}{\alpha V_i + Q_{\text{出}i}} \quad (5)$$

上式中:

C_i ——第 i 出库水体单元出库水污染物浓度,也是此时水库污染物浓度,mg/L;

V_{i-1} ——第 $i-1$ 出库水体单元终止出库时水库蓄水量, m^3 ;

C_{i-1} ——第 $i-1$ 出库水体单元水污染物浓度,也是此时水库污染物浓度,mg/L;

α ——水库有效混合稀释系数,无量纲;

K^{20} ——水温为 20 °C 时污染物综合衰减系数,1/s;

t_1 ——第 i 出入库水体单元与第 $i+1$ 出入库水体单元时间,s;

θ ——水温修正系数,无量纲;

T ——水体摄氏温度;

$Q_{\lambda i-n}$ ——第 $i-n$ 入库水体单元入库水量, m^3 ;

$C_{\lambda i-n}$ ——第 $i-n$ 入库水体单元污染物到达节点断面的浓度,mg/L;

V_i ——第 i 出库水体单元水量终止出库时水库蓄水量, m^3 ;

$Q_{出i}$ ——第 i 出库水体单元出库水量, m^3 。

入库污染物到达节点断面的浓度 $C_{\lambda i-n}$ 分两种情况:

①忽略综合混合扩散作用

对于一维模型,忽略纵向综合混合扩散作用时:

$$C_{\lambda i-n} = C_{\lambda i-n}^0 \exp(-K^{20} \theta^{T-20} t_{i-n}) \quad (6)$$

式中: t_{i-n} ——第 $i-n$ 入库水体单元入库污染物在水库停留时间,即第 $i-n$ 入库水体单元入库后到达节点断面的时间, $n=0, 1, 2, \dots, n$, 其中, $t_{i-n} =$

$\frac{aV_{i-n}}{bQ_{i-n} + V_{i-n}}$, s; $C_{\lambda i-n}^0$ ——第 $i-n$ 入库水体单元入库污染物浓度,mg/L。

②纵向综合混合扩散作用不可忽视

$$C_{\lambda i-n} = C_{\lambda i-n}^0 \exp\left[\frac{U_{i-n} X}{2E_{i-n}} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4KE_{i-n}}{U_{i-n}^2}}\right)\right] \quad (7)$$

U_{i-n} ——第 $i-n$ 入库水体单元水体平均流速,m/s;

X ——入库处至节点断面距离(对于小浪底水库 $X=131\ 000$ m),m;

E_{i-n} ——第 $i-n$ 入库水体单元平均纵向综合混合扩散系数, m^2/s ;

K ——入库污染物综合衰减系数,1/s;

(5)式是在第 $i-1$ 出库水体单元水质(即水库下泄水水质)的基础上,预测第 i 出库水体单元水质。因此,该模型称之为“动态河道型水库水质模型”。

4 模型参数率定

模型参数精度决定着模型精度,模型参数率定是建模过程中重要的一个环节。对于水质现状实测法率定模型参数,只要是水质现状实测频率适当高,即出入库水体单元划分得适当密,率定的模型参数精度也就相对高,而经济上相比却相对低廉。

(1) 建立目标函数

将小浪底水库下泄水水质监测数据(SC_i)与水质模型(5)模拟计算值(C_i)建立非线性目标函数:

$$\min \sum_{j=1}^n (C_i - SC_i)^2 \quad (8)$$

约束条件:

$$n = \text{int}\left(\frac{t_i}{t_1}\right) = \text{int}\left[\frac{aV}{t_1 \times (bQ + V)}\right] \quad (9)$$

$$E_i = \left(\frac{1}{t_i} - \frac{1}{t_s}\right) x^2 \quad (10)$$

式中: t_s ——水力停留时间,s。

(2) 模型参数率定

为了准确、经济率定黄河小浪底河道型水库水质模型参数,决定采用现状水质实测法,即利用2017年11月~2018年4月期间小浪底水库出入库水水质旬测数据进行模型参数率定。

当入库污染物浓度显著增加,水库下泄水污染物浓度变化过程呈现前缘陡峭、后缘拖尾的“弥散拖尾”现象,在这种情况下需要考虑污染物扩散影响。应用非线性优化方法进行模型参数率定,率定结果见表1。

表1 模型参数率定一览表

Table 1 Model parameter calibration

水质参数	$K^{20} / (1 \cdot s^{-1})$	平均误差/%	θ	有效混合系数	a	b
氨氮	2.5×10^{-7}	1.8	1.06	0.8	2.0	1.3
COD	7.7×10^{-8}	2.1	1.04	0.8		

小浪底水库下泄水各水体单元水质模型计算值与实测值比较见图1、图2。

小浪底水库下泄水水质模型计算结果与实测值相当吻合,平均相对误差不超过3.0%,表明推

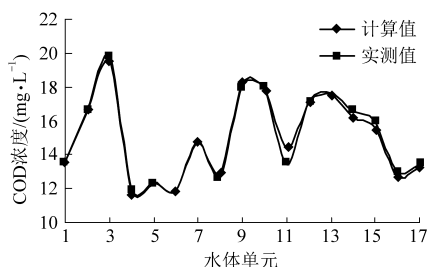


图1 COD模型计算值与实测值比较

Fig.1 Comparison between calculated value of COD model and measured value

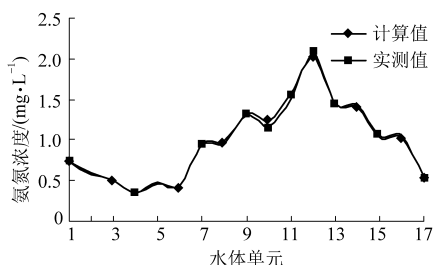


图2 氨氮模型计算值与实测值比较

Fig.2 Comparison between calculated value of ammonia nitrogen model and measured value

导的模型以及估算入库污染物在水库停留时间经验公式结构合理,率定的模型参数精度高、可靠。

5 模型验证

黄河小浪底水库出入库处分别设有常规水质监测断面(即长年每月水质监测一次的水质监测断面),利用常规水质监测数据进行模型验证,这就意味着将出入库水体单元划分得较疏,这样模型精度也就相应有所降低。

选取2018年5月~2019年4月非汛期小浪底入库污染源相对稳定的水文、水质月监测数据进行模型验证,验证结果见表2。

从上述检验结果可以看出,当入库水质相对稳定时,利用月水质监测数据进行模型验证,其平均相对误差COD为15%、氨氮为19%。

6 河道型水库水环境同化容量

6.1 河道型水库水环境同化容量计算式

河道型水库水环境同化容量,即节点断面污染物浓度维持不变的情况下,水库允许接纳的污

表2 模型检验结果

Table 2 Model test results

污染因子	实测值/(mg·L ⁻¹)	模型计算值/(mg·L ⁻¹)	相对误差/%	平均相对误差/%
氨氮	0.44	0.35	-21	19
	0.44	0.30	-32	
	0.37	0.37	0	
	0.34	0.41	21	
	0.52	0.63	21	
COD	12	15	25	15
	16	15	-10	
	15	18	23	
	15	17	11	
	11	11	4	

染物量 W ($W = Q_{\lambda i-n} C_{\lambda i-n}$),由(3)式移项得到:

$$W = Q_{\lambda i-n} C_{\lambda i-n} = C_i (\alpha V_i + Q_{\text{出}i}) - \alpha V_{i-1} C_{i-1} e^{-K^{20} t_i \theta T - 20} \quad (5)$$

(5)式中 W 除以 $\sum Q_{\lambda}$ 得到允许接纳污染物浓度值。比较计算的允许接纳的污染物浓度与实际入库水污染物浓度,即可评估河道型水库水环境同化容量计算公式实用性。

《黄河流域及西北内陆河水功能区划》将小浪底水库为“黄河小浪底饮用工业用水区”,执行Ⅲ类水水质标准值。水环境同化容量仅仅反映的是水体综合自净能力,不包括水体对污染物的稀释

差值容量,因此有: $C = C_i = C_{i-1} = C_{\text{标准}}$ (即 $\text{COD}_{\text{标准}} = 20 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}_{\text{标准}} = 1.0 \text{ mg/L}$)。

若水库蓄水量维持不变(即: $V_i = V_{i-1} = V$),则有: $Q_{\lambda i-n} = Q_{\text{出}i} = Q$ 。那么,由(5)式得到河道型水库水环境同化容量 W 计算公式:

$$W = CQ + \alpha VC(1 - e^{-K^{20} t_i \theta T - 20})$$

6.2 非汛期小浪底水库水文条件统计

2015年1月~2019年5月小浪底水库每月10日蓄水量(V)、入库污染物在水库停留时间及其该时间段月平均下泄水流量(Q)统计结果见表3。

表 3 不同水文条件下入库污染物停留时间

Table 3 Residence time of influent pollutants under different hydrological conditions

蓄水量/亿 m ³	比例/%	水文参数		停留时间/月
		V/亿 m ³	Q/(亿 m ³ ·月 ⁻¹)	
10~20	7.9	18	8.6	1.2
20~30	10.5	26	10.3	1.3
30~40	21.1	35	15.0	1.3
40~50	18.4	46	14.4	1.4
50~70	21.1	61	17.3	1.5
70~90	21.0	80	23.1	1.5

6.3 小浪底水库水环境同化容量

持Ⅲ类水水质标准值的水环境同化容量及入库允许浓度值计算结果见表 4。

不同水文条件下,小浪底水库下泄水水质维

表 4 小浪底水库水环境同化容量(水温 10 ℃)

Table 4 Water environmental assimilative capacity of Xiaolangdi Reservoir (water temperature 10 ℃)

水文条件		氨氮		COD	
V 平均值 /亿 m ³	Q 平均值 /(亿 m ³ ·月 ⁻¹)	入库允许浓度 /(mg·L ⁻¹)	同化容量 /(kg·s ⁻¹)	入库允许浓度 /(mg·L ⁻¹)	同化容量 /(kg·s ⁻¹)
18	8.6	1.6	0.44	25.00	6.90
26	10.3	1.8	0.54	27.00	8.10
35	15.0	1.7	0.76	26.00	11.60
46	14.4	2.0	0.80	0.98	1.29
61	17.6	2.2	0.98	30.00	13.60
80	23.1	2.2	1.29	30.00	17.90

将表 4 计算结果与计算条件相近的出入库 COD、氨氮浓度实测值比较,发现模型计算的入库允许浓度基本与实际情况相符,表明上述推导、率定的动态河道型水库水质模型精度较高。

7 结 论

根据物料平衡原理,认为入库水和水库原有蓄水水中的污染物衰减服从动力学一级反应,推导出动态河道型水库水质模型及其水环境同化容量计算式,应用不同的入库和出库水质监测数据分别对模型参数进行了识别和模型检验,检验结果为平均相对误差不大于 20%,并且得出不同水文条件下的小浪底水库水环境同化容量,表明该模型可以较准确地预测小浪底水库下泄水水质。

本文提出的从入库污染物混合稀释和污染物综合衰减方面考虑建立河道型水库水质模型,并用于河道型水库水环境同化容量计算,经济且更加简便实用。

参考文献

[1] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡水库整体一维水质数学模

- 拟研究 [J]. 水利学报, 2002 (12): 7-10.
- [2] 师洋, 徐志修, 毛玉霞. 小浪底水库对河道水质净化能力的影响 [J]. 环境工程, 2007 (1): 74-75+5-6.
- [3] 肖翔群, 夏润亮, 伍丽平, 等. 立面二维水质模型预测小浪底出库水质研究 [J]. 人民黄河, 2011, 33 (12): 71-75.
- [4] 李海华, 邢静, 李喜柱, 等. 基于 BP 神经网络的黄河小浪底济源断面水质评价模型研究 [J]. 节水灌溉, 2014 (6): 57-59.
- [5] 侯传莹, 易雨君, 宋劼, 等. 小浪底水库水沙调控对下游河道水质的影响 [J]. 人民黄河, 2019, 41 (8): 32-37.
- [6] 朱东方, 赵开楼, 白泉. 小浪底水库水质分析与预测 [J]. 山东化工, 2019, 48 (17): 109-111.
- [7] 武俐, 王祖恒, 王亮, 等. 基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价 [J]. 水土保持通报, 2020, 40 (5): 118-123.
- [8] Gerard, Farrell J, Heinz G, et al. Mathematical modeling of plunging reservoir [J]. Hydraulic Research, 1988 (5): 525-537.
- [9] Cole T M. CE-QUAL-W2-A 2D hydrodynamic and water quality model for rivers, lakes, reservoirs, and estuaries [C] //4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality. Ceshe Budejovice; Czech Republic, 2002: 12-16.

- [10] 邢立文, 魏新平. 基于 Elman 神经网络模型的西河水库水质评价 [J]. 人民长江, 2020, 51 (7): 64-70.
- [11] 李添雨, 李振华, 黄炳彬, 等. 基于 MIKE21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41 (1): 293-300.
- [12] 但雨生, 周忠发, 吴跃, 等. 基于分形插值模型的平寨水库水质评价 [J]. 环境化学, 2020, 39 (4): 987-998.
- [13] 李韶慧, 周忠发, 但雨生, 等. 基于组合赋权贝叶斯模型的平寨水库水质评价 [J]. 水土保持通报, 2020, 40 (2): 211-217.
- [14] 王文娥, 廖伟, 漆力健. 宽窄相间河道水流紊动特性试验研究 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (3): 394-403.
- [15] 王聪, 王淑莹, 张森, 等. 厌氧/缺氧/好氧生物接触氧化处理低碳氮比污水的物料平衡 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (19): 273-281.