

三峡水库水位调度对出库水质影响分析与水质预测

黄玥, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄, 马良

(中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 出于防洪、发电与航运需求, 三峡水库在汛期维持 145 m 低水位运行, 在非汛期抬升水位至 175 m 维持高水位运行。水库运行期按水位变化分为: 水位下降期 (175 ~ 145 m)、低水位运行期 (145 m)、水位上升期 (145 ~ 175 m) 和高水位运行期 (175 m)。基于 2011 - 2018 年三峡水库出库断面水质因子 (DO、COD_{Mn} 和 NH₃-N) 监测周报数据, 采用综合水质标识指数 P_i 和自回归综合移动平均模型 ARIMA 模型评价预测水质, 研究三峡水库水位调度对出库断面水质的影响, 探究水质对水位变化的响应, 并预测水质变化趋势。结果表明: 三峡水库季节性水位调度对出库水质影响显著。水质因子 (DO、COD_{Mn}、NH₃-N) 浓度随水位运行期的改变而出现周期性变化, 不同水位运行期水质因子浓度存在差异。高水位运行期 DO 浓度显著高于低水位运行期, COD_{Mn} 和 NH₃-N 浓度小于低水位运行期; 各运行期的综合水质标识指数 P_i 均符合综合水质指标 I 级标准, 其中高水位运行期水质最好, 低水位运行期水质最差; ARIMA 预测结果显示未来水质符合 I 级标准。水库水文条件受季节性水位调度影响, 水质与水位、流量和外源污染输入相关。评价结果有利于在高时间精度下掌握水质实情, 进行水资源管理。

关键词: 出库水质; 水位调度; 影响评价; 综合水质标识指数; 差分自回归移动平均预测模型 (ARIMA); 三峡水库

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0078-08

Analysis and prediction of effects of Three Gorges Reservoir water level scheduling on the outflow water quality

HUANG Yue, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, MA Liang

(Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The Three Gorges Reservoir operates at a low water level of 145 m during flood season and a high water level of 175 m during the non-flood season for the purposes of flood control, power generation and shipping. According to the changes of the water level, the operation period of the reservoir can be divided into four stages, which are descent stage (175 - 145 m), low level stage (145 m), ascent stage (145 - 175 m) and high level stage (175 m). In this study, the outflow water quality in different water levels of the Three Gorges Reservoir was evaluated by using comprehensive water quality identification indicator based on the weekly water quality monitoring data of water quality indicators (DO, COD_{Mn} and NH₃-N) from 2011 to 2018, and a classical time series autoregressive integrated moving average (ARIMA) model was used to predict future water quality changing trends. The objective of this research is to study the influence of water level scheduling of the Three Gorges Reservoir on the outflow water quality and its response to the changes of water level, so as to predict water quality change tendency. The results showed that the seasonal water level scheduling of the reservoir had a significant influence on the outflow water quality. The concentration of the water quality indicators (DO, COD_{Mn}, NH₃-N) presented cyclical changes in response to different operation stages. The concentration of DO was much higher at high level stage than that at low level stage, whereas the concentration of COD_{Mn} and NH₃-N was the opposite. Moreover, P_i at different stages all maintained Class I standard of comprehensive water quality, with

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2020-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC05053)

作者简介: 黄玥 (1994-), 女, 山东泰安人, 硕士, 主要从事景观生态学研究。

通讯作者: 黄志霖 (1966-), 男, 河南信阳人, 博士, 研究员, 研究方向为流域生态水文学。

the best water quality occurring at high level stage and worst at low level stage. Predicting outcomes of ARIMA model show that the water quality will maintain Class I standard in the future. It is found that the water quality of the reservoir is affected by the water level, flow and exogenous pollution input under the influence of seasonal water level scheduling. This study can help better manage water resources with the approach of high precision water quality information.

Key words: outflow water quality; water level scheduling; impact assessment; comprehensive water quality identification indicator; autoregressive integrated moving average (ARIMA) prediction model; Three Gorges Reservoir

1 研究背景

三峡工程是目前世界上最大的水利水电工程,在长江中下游洪涝治理工作中发挥关键作用^[1-2],历经2003年一期蓄水、2006年二期蓄水和2010年175 m水位蓄水后,在汛期和非汛期三峡水库运行水位分别维持在145和175 m左右。由于三峡水库运行受季节性水位调度,水质季节性特征发生显著变化^[3-4]。三峡水库的运行使水动力条件明显改变、河道水沙时空变化规律发生变化^[5]、流域结构趋向简单^[6-7],导致三峡水库水环境参数与天然河道间存在显著差异。三峡库区范围内产生的水环境、水生态、水体污染与水华问题,引起国内外广泛关注^[8-10]。

水位是影响水质和水生态稳定性的重要因素,一方面水位变动会改变水库蓄水量,另一方面因水动力改变会引发水化学和水环境变化。水位作为调节三峡水库生态环境的重要因素,研究水质对水位变化的响应,对水质改善与生态系统稳定有重要意义^[11]。三峡水库干流出库水质年变化监测结果表明:2003年三峡水库蓄水至135 m,较蓄水前水质明显好转,污染物和DO等氧平衡指标浓度呈下降趋势^[12]。蓄水至156 m后,主要污染物浓度呈下降趋势,蓄水对干流水质未造成不良影响。除水库水位、流量具有季节性周期变动之外,水库上游来水量及含沙量、库区土壤侵蚀和农业非点源污染输出均随季节变化而发生周期性变化,这些都会影响水库水质的季节周期性改变^[13]。在三峡库区水质年度变化及其变化趋势研究基础上,研究三峡水库水位的季度调控下,三峡水库出库水质的季节性变化以及对水位变化的响应特征,分析不同水位条件下水质因子浓度和综合水质标识指数的变化特征,研究各水位运行期水质因子对水位的响应,为三峡库区水质保护提供科学依据。

2 研究区域概况

三峡水库在2003年6月蓄水至135 m,2006年

10月蓄水至156 m,2008年汛末开始175 m试验性蓄水,2010年10月正式蓄水至175 m正常水位^[14]。三峡水库在枯期蓄水至正常水位175 m发挥航运、发电作用,汛期水位下降至145 m发挥蓄洪作用,三峡水库年度水位调度运行图如图1所示。可将年内水位运行期划分为4个时期,即I期:水位降低期(175~145 m);II期:低水位运行期(145 m);III期:水位上升期(145~175 m);IV期:高水位运行期(175 m)。

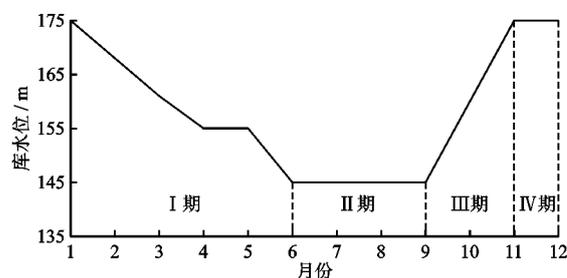


图1 三峡水库年度库水位调度运行图

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

水质因子数据来源于中国生态环境数据中心 (<http://datacenter.mep.gov.cn/websjzx/dataproduct/>),环境质量数据中包含水环境质量数据,其中全国主要流域重点断面水质自动监测周报数据(2011-2018年中国生态环境中心发布的《地表水监测周报》)为本文研究中使用的官方发布的观测数据。生态环境部(原环境保护部)在全国主要水系设立了145个重点断面水质自动监测站,并设定了8项水质监测指标:水温、pH、浊度、溶解氧、电导率、高锰酸钾指数、氨氮和总有机碳。

根据中国环境监测总站监测报告、三峡水库干流断面水质状况监测结果及其水质变化原因可知,三峡水库水质状况改变主要受水体中DO、COD_{Mn}和NH₃-N浓度变化的影响。本文选取三峡水库出库断面DO、COD_{Mn}和NH₃-N浓度的监测数据。监测

断面为三峡库区长江流域宜昌南津关,属于三峡库区长江干流出库断面。

库水位与出库流量数据来源于长江海事局每日港口水情 (<https://cj.msa.gov.cn/xxgk/xxgkml/aq-xx/swgg/>),依据长江海事局发布的水位调控通知与水位变动新闻 (https://cj.msa.gov.cn/xxgk/xxgkml/aqxx/gksq/index_18.shtml)划分历年水位变动时间。

3.2 综合水质标识指数法

综合水质标识指数能够反映综合水质状况、水质污染程度等水环境信息,可定性定量地评价水质,不因个别异常水质指标而影响综合评价结果^[15]。以《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)^[16]为依据,综合水质标识指数法在单因子水质标识指数法基础上,客观评价 I~劣 V 类水质^[17],判定标准如表 1 所示。

表 1 基于综合水质标识指数的水质级别判定标准

判断依据	综合水质级别
$1.0 \leq p_i \leq 2.0$	I 类
$2.0 \leq p_i \leq 3.0$	II 类
$3.0 \leq p_i \leq 4.0$	III 类
$4.0 \leq p_i \leq 5.0$	IV 类
$5.0 \leq p_i \leq 6.0$	V 类
$6.0 \leq p_i \leq 7.0$	劣 V 类,但不黑臭
$p_i > 7.0$	劣 V 类,并黑臭

3.2.1 单因子水质标识指数 单因子水质标识指数 p_i 代表单项水质指标浓度在《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)对应类别,计算公式如下:

$$p_i = x_1 \cdot x_2 \quad (1)$$

式中: x_1 为第 i 项水质指标所在水质类别; x_2 为水质浓度因子在 x_1 类水质变化区间的位置。

当水质介于 I~V 类水之间时,对于非 DO 类指标(pH 值、DO、温度除外)和 DO 指标分别以公式(2)和(3)进行计算:

$$x_1 \cdot x_2 = k + \frac{c_i - c_{i,k\downarrow}}{c_{i,k\uparrow} - c_{i,k\downarrow}} \quad (2)$$

$$x_1 \cdot x_2 = k + 1 - \frac{c_i - c_{i,k\downarrow}}{c_{i,k\uparrow} - c_{i,k\downarrow}} \quad (3)$$

式中: $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表该指标为 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类水; $c_{i,k\uparrow}$ 和 $c_{i,k\downarrow}$ 分别为第 i 类水质在 k 类水质标准区间内的上限与下限; $x_1 \cdot x_2$ 按四舍五入原则取小数点后 1 位。

3.2.2 综合水质标识指数 综合水质标识指数由

各项单因子水质标识指数平均值以及代表水质类别与功能区划规定等因素构成,其计算公式为:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (4)$$

式中: X_1 为整体水质类别; X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间内所处位置; X_3 为参与水质评价因子中,劣于水环境功能类别的单因子个数; X_4 用于判别水质类别是达到水环境功能类别目标。

$X_1 \cdot X_2$ 为各项单因子水质标识指数的平均值,计算公式为:

$$X_1 \cdot X_2 = \frac{1}{n} \sum (p_1 + p_2 + \dots + p_n) \quad (5)$$

式中: $p_i = x_{i1} \cdot x_{i2}$; n 为参与综合评价的水质因子个数; $x_{i1} \cdot x_{i2}$ 对应单因子水质标识指数。

3.3 水质变化评估与预测

采用差分自回归移动平均模型 - ARIMA 模型,基于历史数据概括时间序列并预测未来水质。水库水质变化具有渐变性和非线性、非确定性的特点,水质因子浓度不但受外界条件影响,还受时间变化、随机波动和历史值的影响,故预测模型需考虑滞后性因素的影响^[18]。ARIMA 模型应用广泛,已被证实为一种有效的选取滞后项的数学方法,ARIMA 模型在气候变化、经济管理,医疗卫生、水位变化预测和水质变化趋势预测中均有良好的应用^[19-22]。本研究旨在利用 ARIMA 模型分析预测水质变化趋势,限于篇幅,不对 ARIMA 模型原理做过多描述。

ARIMA 模型考察了时间序列的动态和持续性,揭示未来与现在的相互关系,模型基本原理是:将随时间推移而变化的数据序列视为随机序列,并计算出能代表其变化的模型做出近似描述,模型破译即可依据历史数据预测未来。ARIMA 中的 AR 为自回归分量, I 为差分, MA 为移动平均分量; ARIMA (p, d, q) 中的 p 为自回归分量阶数, q 为移动平均分量阶数, d 为使时间序列平稳的差分次数。

ARIMA 的一般表达式为:

$$X_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_t - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon \quad (6)$$

式中: X_t 为研究序列; t 为时间序号; $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 为自回归 AR 系数; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为移动平均 MA 系数; $\varepsilon_1, \varepsilon_{t-1}, \dots, \varepsilon_t$ 为服从均值为 0、方差为 δ_ε^2 的白噪音过程。

ARIMA 模型建模共需 4 步:序列平稳性检验、模型初步识别、参数估算和模型诊断分析。SPSS 软件满足上述工作要求,能进行模块预处理、填补缺值、建立时间序列和序列平稳化、图形输出和结果分

析等工作,适合处理 ARIMA 模型。

4 结果与分析

4.1 三峡水库水位与出库流量特征

2011 - 2018 年三峡水库水位变动与出库流量变化过程如图 2 所示,计算出年内各水位运行时期的平均库水位与平均出库流量见表 2。由图 2 和表 2 可看出,三峡水库水位与出库流量因水位调度产生周期性变化,差异明显。汛期三峡水库水位下降,此时出库流量最大,平均出库流量从 9 031.43 m³/s 上升至 21 297.03 m³/s,出库流量最高达 45 200 m³/s。汛期结束进入枯水期,库区水位最高抬升至 175 m,出库流量明显减少,平均出库流量从 13 715.71 m³/s 下降至 7 523.33 m³/s,出库流量最低至 5 240 m³/s。

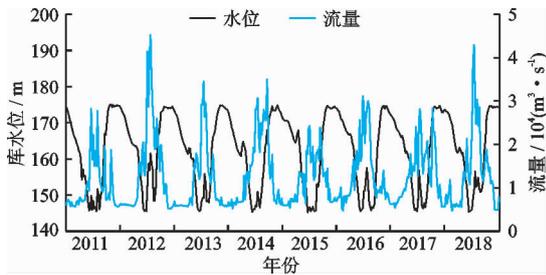


图 2 2011 - 2018 年三峡水库水位与出库流量变化过程

表 2 三峡水库各水位运行期平均水位与平均出库流量

运行期	平均水位/m	平均出库流量/(m ³ ·s ⁻¹)
I 期	162.79	9031.43
II 期	150.17	21297.03
III 期	169.41	13715.71
IV 期	173.97	7523.33

4.2 水质与库水位调度、出库流量的相关性

不同水位时期的水质因子浓度与库水位、出库流量的 Person 相关系数见表 3。表 3 表明,DO 浓度与库水位呈极显著正相关,与出库流量呈极显著负相关;NH₃-N 与库水位变化呈显著负相关;COD_{Mn} 浓度与库水位和出库流量变化无显著相关。通过 Pearson 相关性检验可知,库水位周期性变化对断面水质有显著影响。

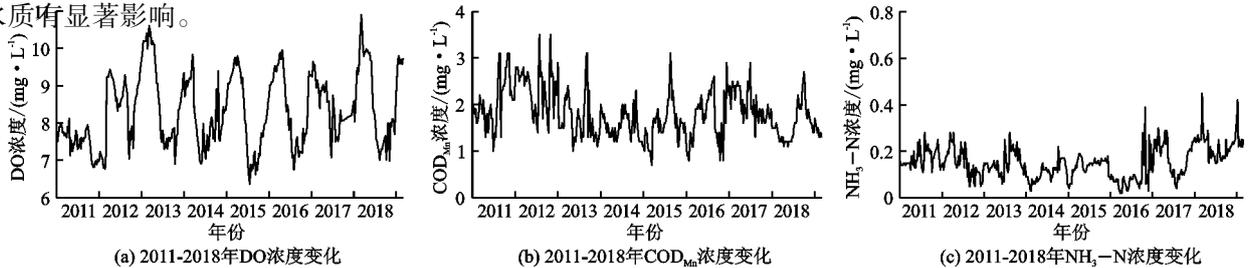


图 3 2011 - 2018 年三峡水库出库断面各水质因子浓度变化

表 3 各水质因子浓度与库水位、出库流量的相关系数

水质因子	水位	出库流量
DO	0.460 **	-0.382 **
COD _{Mn}	-0.028	0.098
NH ₃ -N	-0.105 *	-0.071

注: * 表示显著相关; ** 表示极显著相关。

4.3 各水位运行期水质因子差异

2011 - 2018 年三峡水库出库断面各水质因子浓度变化见图 3,不同运行期各水质因子浓度箱形统计图见图 4。

对 2011 - 2018 年三峡水库各水位运行期水质因子浓度均值进行统计,结果见表 4;并对不同水位运行期的各水质因子浓度进行差异检验,结果见表 5。通过分析表 4 和 5 可知:(1)DO 浓度在年内显示出明显的周期性与波动性,出现“高 - 低 - 高”的波动变化。COD_{Mn} 和 NH₃-N 浓度年内无明显波动变化。(2)总体上非汛期水质优于汛期水质。各水位运行期 DO 平均浓度在高水位运行期(IV 期) > 水位降低期(I 期) > 水位抬高期(III 期) > 低水位运行期(II 期),I、IV 期与 II、III 期 DO 浓度差异显著 ($p < 0.05$)。COD_{Mn} 平均浓度在 II 期 > III 期 > I 期 > IV 期,各时期 COD_{Mn} 平均浓度符合 I 类标准,I、II、IV 时期差异显著 ($p < 0.05$)。NH₃-N 平均浓度在 II 期 > III 期 > I 期 > IV 期,NH₃-N 平均浓度在 I、II 和 III 期符合水质 I 类标准,在 IV 期符合水质 II 类标准,II 期与 IV 期平均浓度差异显著 ($p < 0.05$)。

4.4 各水位运行期的综合水质标识指数 P_i 差异

对 2011 - 2018 年三峡水库出库断面 P_i 值的变化进行统计,结果见图 5。据此计算得出 P_i 值的箱形统计图(图 6)并对各水位运行期 P_i 值进行单因素差异检验,其结果见表 6。由表 6 可见,各水位时期 P_i 无显著差异显著。各水位期间 P_i 均为综合水质标准下的 I 类水, P_i 均值在 II 期(1.65) > III 期(1.61) > I 期(1.61) > IV 期(1.57),表明 IV 期水质最好,II 期水质最差,总体上非汛期高水位运行时期水质优于汛期低水位运行时期水质。

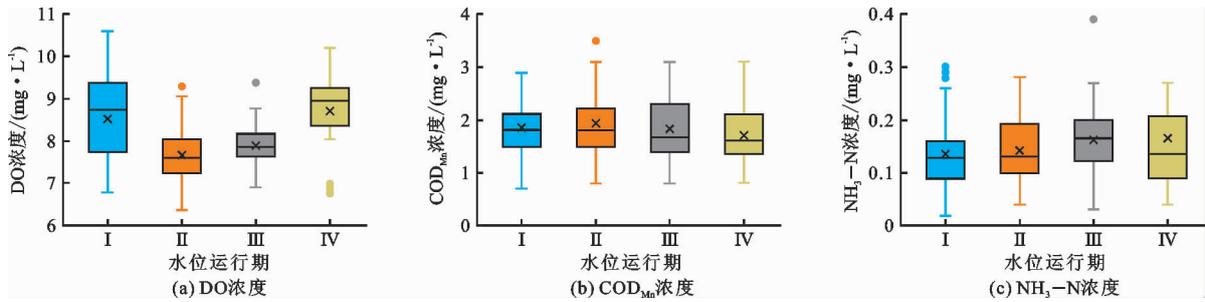


图4 2011-2018年三峡水库水位各运行期出库断面水质因子浓度箱形图

表4 三峡水库不同水位运行期各水质因子浓度均值
mg/L

运行期	DO	COD _{Mn}	NH ₃ -N
I期	8.64	1.79	0.14
II期	7.61	1.93	0.15
III期	7.89	1.80	0.14
IV期	8.73	1.69	0.13

4.5 水质变化趋势预测

2011-2018年三峡水库各水质因子浓度实测值与ARIMA模型拟合值对比如图7所示。依照《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)^[23],取20%作为2011-2018年模型拟合值与实测值的允许误差,判定模型精度,结果如表7所示,各水质因子的ARIMA模型拟合精度均在允许范围内,表明模型可用。

表5 三峡水库不同水位运行期各水质因子浓度单因素差异检验

运行期	DO				COD _{Mn}				NH ₃ -N					
	I期	II期	III期	IV期	I期	II期	III期	IV期	I期	II期	III期	IV期		
I期		1.03*	0.75*	-0.09	I期		-0.15*	-0.02	-0.10*	I期		-0.01	0	0.01
II期	-1.03*		0.28	-1.12*	II期	0.15*		0.13	0.24*	II期	0.01		0.01	0.02*
III期	-0.75*	0.28		-0.84*	III期	0.02	-0.13		0.11	III期	0	-0.01		0.01
IV期	-0.09	1.12*	0.84*		IV期	-0.10*	-0.24*	-0.11		IV期	-0.01	-0.02*	-0.01	

注: *表示显著相关, **表示极显著相关。

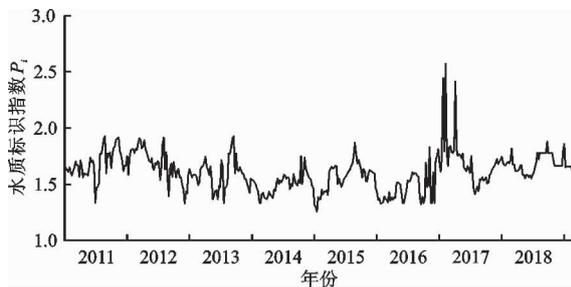


图5 2011-2018年三峡水库出库断面综合水质标识指数 P_i 值变化

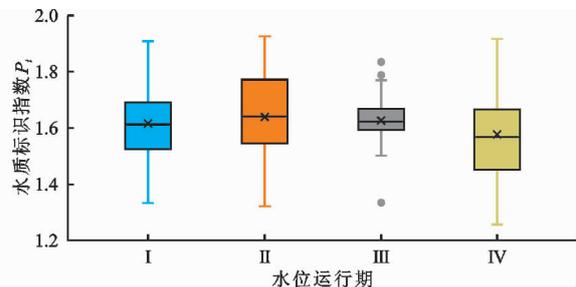


图6 2011-2018年三峡水库各水位运行期出库断面综合水质标识指数 P_i 值箱形统计图

利用表7中的ARIMA模型预测2019年不同水位运行期各水质因子浓度并计算其 P_i 值,预测结果如表8所示。预测结果显示:2019年不同水位时期的DO和COD_{Mn}符合I级标准,NH₃-N浓度偏向II级标准;低水位运行期的COD_{Mn}浓度和NH₃-N浓度最高,DO浓度最低;高水位运行期的COD_{Mn}浓度和NH₃-N浓度最低,DO浓度最高。低水位运行时 P_i 最大,水质最差;I期水位降低期和IV期高水位

运行期的 P_i 接近,水质最好。

表6 三峡水库不同水位运行期 P_i 值单因素差异检验

运行期	I期	II期	III期	IV期
I期		-0.036	-0.001	0.039
II期	0.036		0.041	0.081
III期	0.001	-0.041		0.038
IV期	-0.039	-0.081	-0.038	

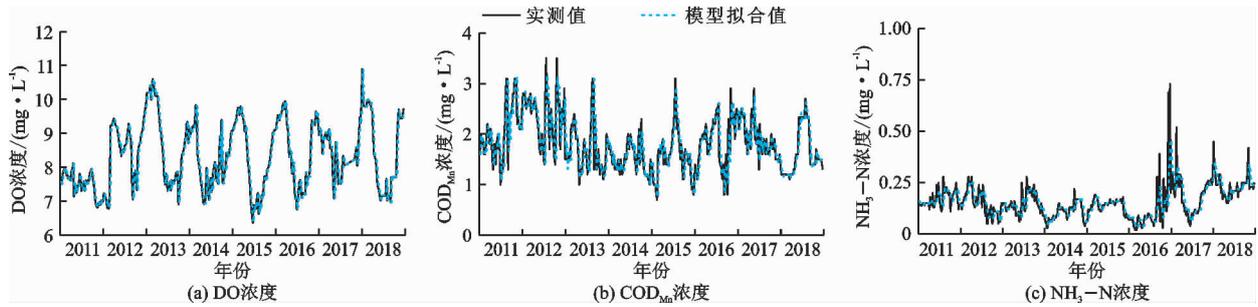


图 7 2011 - 2018 年三峡水库各水质因子浓度实测值与 ARIMA 模型拟合值对比

表 7 ARIMA 模型拟合精度判定

水质因子	ARIMA 模型	预测平均精度	模型合格率	模型精度等级
DO	ARIMA (1,1,1)	97.28%	99.99%	甲等
COD _{Mn}	ARIMA (2,1,2)	87.25%	84.04%	乙等
NH ₃ -N	ARIMA (1,1,1)	80.74%	77.02%	乙等

表 8 三峡水库各水质因子浓度 2019 年 ARIMA 模型预测值 mg/L

水质因子	各水位时期预测值			
	I 期	II 期	III 期	IV 期
DO	8.59	7.53	7.62	8.68
COD _{Mn}	1.80	1.96	1.80	1.75
NH ₃ -N	0.14	0.15	0.15	0.14
P _i	1.62	1.65	1.63	1.62

5 讨 论

三峡水库运行后,其下游河道汛期和秋季径流量减少,枯水期径流量增大,三峡水库的调蓄作用削弱了洪水期与枯水期径流量的波动性^[24-25]。三峡水库对非汛期的径流调节影响了河道自然发展过程,包括水体营养物质的吸收与扩散^[26]。极端流量的改变会对河道中养分交换产生影响^[27]。因三峡水库周期性蓄水,下泄水量在时空尺度发生变化,改变了原有水文与洪水时空分布规律,影响了下游水资源分配和水生态环境^[28-29]。

5.1 水质因子浓度变化

三峡库区长江干流水质与水位调度密切相关,水库水质变化与蓄水后流速变化引发的蓄清作用有关,也受上游来水量、支流汇水和污染输入等因素影响,三峡水库为典型河道型水库,汛期排浑,汛后蓄清。汛期入库沙量占全年 80% 以上,水位降至 145 m 泄洪,可将泥沙排至下游;汛后蓄水至 175 m,下游补水,维持航运。三峡水库调度在汛期采取来泄

相当的方式,非汛期来泄水与天然河道差别加大,对库区断面水文条件造成影响^[30]。

三峡库区主要污染源包括农业面源污染、城镇生产生活污水、养殖污染、船舶污染等^[31]。DO 是水体水质的正功效指标,DO 浓度变化与径流量密切相关。高水位水期 DO 浓度高于低水位时期。低水位时期较低的 DO 浓度一方面与水文变化有关,另一方面与低水位时期高温有关。三峡水库蓄水时,河道水位因大坝拦蓄作用而升高,下泄水是下游水体 DO 浓度增加的主要原因,故高水位运行期 DO 浓度增加^[32]。汛期出库流量大,不仅削弱表层水体的复氧能力,也减少了下层少氧水体的物质交换能力,这也是低水位运行期 DO 浓度下降的原因之一。在水质研究中温度与 DO 呈负相关关系的认识已达成共识^[33]。低水位运行期水库水体温度较高,水体中 DO 随水温升高而下降;高水位运行期水温低,生物活性弱而耗氧少,故此期间 DO 浓度较高^[34]。

COD_{Mn} 和 NH₃-N 是反映水质的负向指标。COD_{Mn} 用于表示地表水有机化合物与无机化合物的污染程度,而有机化合物可不同程度的吸附于悬浮颗粒上。高水位运行期 COD_{Mn} 和 NH₃-N 浓度低于低水位运行期,与水库水文变化和污染输入密切相关。三峡水库高水位运行时,水面变宽、水位抬高与流速下降使得水体滞留时间增加,泥沙悬浮物沉降作用随之增强,水体中吸附于泥沙的有机污染物浓度下降,而与悬浮物相关性较大的 COD_{Mn} 含量随之下降^[35-36]。

低水位运行时水位和水量下降导致水环境容量减小,COD_{Mn} 等有机污染物不易扩散,导致水质恶化;汛期降雨多,入库流量大,快速流动的水体削弱悬浮物沉降作用,水体中残余的 COD_{Mn} 浓度增加。夏季温度高,有利于水生生物繁殖及水体有机物增加;汛期有机污染物随地表径流进入水体,大量上游及库区泥沙进入水体,导致水体 COD_{Mn} 含量增加^[37]。低水位时期水体 NH₃-N 浓度高与外源输

入有关。夏季农业活动频繁,常施加以尿素和碳酸氢铵为主的化肥,而夏季暴雨洪水频发,农药化肥侵入水体,造成低水位时期水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高^[38]。低水位时期入库流量显著增加,快速流动的水体对水库底泥扰动增强,加快底泥中有机氮向 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的转变,增加上层水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度^[39]。

5.2 综合水质标识指数 P_i 变化

本文采用综合水质标识指数评价水质,2011—2018年各个水期的 P_i 维持综合水质级别 I 级标准,高水位运行期水质最好,低水位运行期水质最差。低水位运行期,三峡水库水位低而库容小,水体滞留大量污染物。单因子标识指数分析表明,低水位运行期 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 数值高于其他 3 个时期,而 DO 数值低于其他 3 个时期,表明该时期有机物污染和还原性污染较严重。高水位运行期,水库蓄水后,水位高而库容大,能有效稀释污染物浓度。高水位运行期水流速下降,在此期间,水库发挥吸附功能,且不会发生解吸,故不会造成二次污染,泥沙吸附后则会伴随水体中悬浮物、重金属等沉入底泥^[40]。

5.3 水质变化趋势评价

三峡水库正式运行后,水质状况主要受入库水量、泥沙沉积量、污染排放等因素影响。三峡库区水质污染源主要为非点源污染和农药化肥导致的面源污染,此外,城市生活用水、工厂生产污水排放也会造成污染。低水位运行期入库水量大,大量污染物伴随降雨与地表径流进入水体;而高水位运行期气温低、水库储存大量水体,不利于污染物扩散。利用 ARIMA 模型预测 2019 年不同水位时期水质因子浓度和 P_i ,预测结果显示 2019 年不同时期的各项水质因子浓度处于良好状态,符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) I 类标准,各个时期综合数值标识指数 P_i 符合 I 类标准,且高水位运行期水质仍优于低水位运行期水质,水质预测结果表明出库水质仍受水库水位调节影响而发生规律变化。

6 结 论

本文基于三峡水库出库断面 2011—2018 年水质周监测数据和每日水情监测结果,按照三峡水库不同运行期,即水位下降期(175~145 m)、低水位运行期(145 m)、水位上升期(145~175 m)和高水位运行期(175 m)研究三峡水库水质变化情况。监测、研究及评价与预测结果表明,三峡水库水位调度运行引发了水库水位、出库流量和水质的周期性变化,主要结论如下:

(1)水质参数具有典型的季节性变动特征。DO 浓度表现为在高水位运行期最高,低水位运行期最低。 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在高水位运行期最低,低水位运行期最高。DO 浓度与三峡水库水位变化呈正相关,与出库流量呈负相关。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度与三峡水库水位变化呈负相关。 COD_{Mn} 浓度与水位、流量变化无显著相关。

(2)三峡水库出库断面水质符合国家 I 类水标准。采用综合水质标识指数 P_i 评价,2011—2018 年各水位运行时期的综合水质标识指数 P_i 均符合清洁标准,高水位运行期水质优于低水位运行期水质。

(3)应用 ARIMA 模型模拟并预测三峡水库出库水质,精度检验结果证明模型可用。通过更新实时数据为水质预测提供了一种途径。

参考文献:

- [1] 郑守仁. 三峡工程水库大坝安全及长期运用研究与监测检验分析[J]. 长江技术经济, 2018, 2(3):1-9.
- [2] 伍勇,柳鑫,龙飞,等. 三峡工程蓄水后宜昌站水流特性变化及测验措施[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5):22-26.
- [3] 陈进. 长江流域水资源调控与水库群调度[J]. 水利学报, 2018, 49(1):2-8.
- [4] 王俊,程海云. 三峡水库蓄水期长江中下游水文情势变化及对策[J]. 中国水利, 2010(19):15-17+14.
- [5] 王敏,肖建红,于庆东,等. 水库大坝建设生态补偿标准研究——以三峡工程为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1):37-49.
- [6] 方春明,胡春宏,陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(1):36-41.
- [7] 李海辉. 鄱阳湖主湖区与碟形湖水位变化及其对水质的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6):1298-1306.
- [8] 周建军,张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6):1471-1488.
- [9] 王晓青,郭劲松. 三峡蓄水对小江 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 TP 纳污能力的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4):674-678.
- [10] 许秋瑾,郑丙辉,朱延忠,等. 三峡水库支流营养状态评价方法[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4):453-457.
- [11] BAO Yuhai, GAO Peng, HE Xiubin. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir - A unique geomorphological unit [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150:14-24.
- [12] LI Siyue, CHENG Xiaoli, XU Zhifang, et al. Spatial and temporal patterns of the water quality in the Danjiangkou Reservoir, China. [J]. Hydrological Sciences Journal,

- 2009, 54(1):124-134.
- [13] 熊超军, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库汛末 175m 试验蓄水过程对香溪河库湾水环境的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5):648-656.
- [14] 王小焕, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区长江干流入出库水质评价及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2):554-565.
- [15] XIA Jingjing, XU Gaohong, GUO Ping, et al. Tempo-spatial analysis of water quality in the Three Gorges Reservoir, china, after its 175 m experimental impoundment [J]. Water Resources Management, 2018,32(9):2937-2954.
- [16] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S]. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [17] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):186-192.
- [18] 李冬, 周川, 袁朋飞, 等. 基于时间序列分析的渐变性生活水源水质预测研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6):184-188.
- [19] 权凌, 周纪, 李明松, 等. 基于时间序列建模的城市热岛时间尺度成分分离方法与应用[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6):723-733.
- [20] 陈礼清, 余海清, 杨旭, 等. 川西南柳杉年轮宽度指数与气候变化的关系[J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(3):293-299.
- [21] YUAN Chaoqing, LIU Sifeng, FANG Zhigeng. Comparison of China's primary energy consumption forecasting by using ARIMA (the autoregressive integrated moving average) model and GM (1, 1) model [J]. Energy, 2016, 100(1):384-390.
- [22] 孙国红, 沈跃, 徐应明, 等. 基于 Box-Jenkins 方法的黄河水质时间序列分析与预测[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1888-1895.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范:GB/T 22482-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] FENG Lian, HU Chuanmin, CHEN Xiaoling, et al. Dramatic inundation changes of China's two largest freshwater lakes linked to the Three Gorges Dam [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17):9628-9634.
- [25] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1):120-130.
- [26] GUO Leicheng, SU Ni, ZHU Chunyan, et al. How have the river discharges and sediment loads changed in the Changjiang River basin downstream of the Three Gorges Dam? [J]. Journal of Hydrology, 2018, 560:259-274.
- [27] 施勇, 栾震宇, 陈炼钢, 等. 长江中下游江湖关系演变趋势数值模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(6):832-839.
- [28] 陈进. 三峡水库建成后长江中下游防洪战略思考[J]. 水科学进展, 2014, 25(5):745-751.
- [29] 袁弘任. 三峡水库纳污能力分析[J]. 中国水利, 2004(20):19-22+5.
- [30] 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 等. 三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11):4946-4955.
- [31] 幸梅, 高煜歆, 汪小艳. 三峡库区污染带及其变化特征[J]. 环境影响评价, 2018, 40(5):66-70.
- [32] 王旭, 肖伟华, 朱维耀, 等. 洞庭湖水位变化对水质影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5):59-62.
- [33] 刘海, 林苗, 殷杰等. 基于 GIS 的鄱阳湖流域非点源吸附态污染物时空变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11):1884-1894.
- [34] 温曰鉴. 三峡库区船舶防污现状及监管对策[J]. 中国海事, 2015(9):42-44+48.
- [35] 顾平, 万金保. 鄱阳湖水文特征及其对水质的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(3):15-19.
- [36] 卓海华, 吴云丽, 刘旻璇, 等. 三峡水库水质变化趋势研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6):925-936.
- [37] 杨乐, 张焯, 侯培强, 等. 三峡水库中下游水体氮磷时空变化与机制分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6):732-738.
- [38] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 等. 三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(6):23-26.
- [39] 李崇明, 黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究(I)——蓄水前污染负荷现状[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5):611-622.
- [40] 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.